INVESTIGACION y CIENCIA

ESTRELLAS DE RAYOS X SUPERBLANDAS

EVOLUCION DE LAS AVES

INFORME ESPECIAL: ASTRONAVES DEL SIGLO XXI

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

CICLIDOS DE LOS LAGOS DE AFRICA ORIENTAL

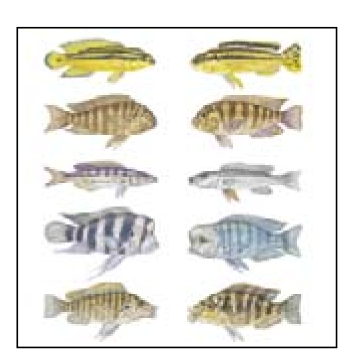
ABRIL 1999
800 PTA. 4,81 EURO





Abril de 1999 Número 271

SECCIONES



Portada: Roberto Osti

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-7	Alfred T. Kamajian
8	Bryan Christie; fuente: Peter Kahabka, Edward P.J. van den Heuvel y Saul A. Rappaport (*arriba*); Wolfgang Pietsch Rosat Team (*abajo, izquierda*); Sven Kohle (*abajo, derecha*)
9	Alfred T. Kamajian
10	Bryan Christie; fuente: Klaus Reinsch (*izquierda*) y Stefan G. Schaeidt (*derecha*)
11	Bryan Christie (*arriba*), Alfred T. Kamajian (*abajo*)
12	Bryan Christie; fuente: Icko Iben
14-15	Daniels & Daniels (*arriba, izquierda*), Johnny Johnson (*arriba, derecha*); Yoram Lehmann, Tompix, Jim Sugar Photography, Donna Binder y Christopher Smith (*abajo, de izquierda a derecha*)
16	CC Studio/SPL/Photo Researchers, Inc.
17	Johnny Johnson
18-19	Tomo Narashima
20	Johnny Johnson
21	*Negroes in the Bilge*, grabado de Deroi, publicado por Engelmann, circa 1835 (lito) de Johann Moritz Rugendas (1802-1858) *Stapleton Collection, U.K./Bridgeman Art Library, London/New York*
22-23	Roberto Osti
24-25	Axel Meyer (*micrografías*); Melanie L. J. Stiassny (*abajo, izquierda*); Ad Konings (*abajo, centro y derecha*)
26	Roberto Osti
27	Dmitry Krasny
44-45	Hugh C. Williams, Univ. de Manitoba en Winnipeg (Canadá)
46	Hugh C. Williams (*arriba*) Johannes Buchmann/Spektrum der Wissenschaft (*abajo*)
47-51	Johannes Buchmann/Spektrum der Wissenschaft
52-54	Gerardo F. Kurtz
55	Cortesía de ABC/Blanco y Negro
56	Gerardo F. Kurtz (*abajo*)
57	Gerardo F. Kurtz, cortesía de ABC/ Blanco y Negro
58-60	Cortesía de Bruce M. Jakosky
61	Centro espacial Johnson, NASA (*izquierda*), J. W. Valley (*derecha*)
62-63	JPL/NASA (*arriba*), Inst. de Ciencias del Telescopio Espacial (*abajo*)
64-65	Slim Films
66	Cortesía de Boeing
67	Alfred T. Kamajian; cortesía de Rotary Rocket Company (*inserto*)
68	FDC/NYMA, Inc.
69	NASA LANGLEY (*arriba*), Johann Rosario (*abajo*)
70	Johann Rosario (*arriba*), Alfred T. Kamajian
72	Leik N. Myrabo
73	Tom Moore y NASA
74-75	Slim Films
76	Laurie Grace
77	Cortesía de Space Access
78	Bob Sauls
79	Dana Berry y Robert O'Dell
80	Cortesía de Kistler Aerospace
81	Don Foley
84-85	Daniels & Daniels
86-87	Matt Colins (*arriba*), Dmitry Krasny

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Estrellas de rayos X superblandas y supernovas*; José M.ª Valderas Martínez: *Hipertensión en los afroamericanos* y *Nexos*; Joandoménec Ros: *Cíclidos de los lagos de Africa oriental*; Diana Estévez: *Factorización de números grandes*; Manuel Puigcerver: *Búsqueda de vida en el sistema solar*; José Meseguer: *Aerorreactores* y *Cables espaciales*; Juan Pedro Adrados: *Autopistas de luz*; Angel Garcimartín: *Velas de luz* y *Perfiles*; J. Vilardell: *Cohetes nucleares compactos, Alcanzar las estrellas, Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; Luis Bou: *Juegos matemáticos.*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, Timothy M. Beardsley, David A. Schneider y Gary Stix, *Associate Editors*; W. Wayt Gibbs, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler, *On-Line Editor*; Mark Alpert, Carol Ezzell, Alden M. Hayashi, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek y Glenn Zorpette, *Editors;* Marguerite Holloway, Steve Mirsky y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Rolf Grisebach
PRESIDENT Joachim P. Rosler

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.150 pta.	20.700 pta.
	67,01 euro	124,41 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

ANTES DE LA TECTÓNICA DE PLACAS. «Frente a las costas de los continentes principales existen grandes cañones submarinos, pero no podemos dar una explicación de su formación a partir de los principios de la geología clásica. Una sugerencia obvia es que fueron excavados por corrientes de agua cuando las laderas oceánicas emergían. ¿Podrían los glaciares del Período Glacial haber sido lo bastante grandes como para reducir los océanos hasta el punto de amontonar agua en la tierra firme hasta una alturas de muchos miles de metros? La mayoría de los geólogos lo dudan. Otra posibilidad es que los continentes y las cuencas oceánicas pudieran haber sufrido vastos corrimientos que expusieran los márgenes a la erosión fluvial. Tales ideas podrían reclamar cambios radicales en conceptos geológicos que se suponían inamovibles.»

GUERRA A LA MALARIA. «La Organización Mundial de la Salud, la Fundación de Auxilio Internacional a la Infancia y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura se disponen a lanzar una ofensiva a gran escala contra la malaria. Gracias al DDT se ha controlado la enfermedad. En Grecia han permanecido equipos de la OMS durante un año, luchando contra la malaria con DDT y fármacos sintéticos. A Birmania, Ceilán, India, Indonesia, Pakistán y Yugoslavia serán enviados equipos similares. En el sur de Grecia, los tres años de tratamiento con DDT para erradicar los mosquitos transmisores han reducido la incidencia de la enfermedad desde un millón a 50.000 casos al año a un costo de 30 centavos por año y persona.»

...cien años

SUBMARINO PRIMITIVO. «El interés general suscitado por las prestaciones del torpedero submarino *Gustave Zédé* no guarda proporción con el verdadero valor ofensivo de este tipo de embarcación. En la idea de un buque de guerra que pueda desplazarse sin ser visto por la profundidad del mar y causar al enemigo un impacto fatal inesperado hay algo que capta la fantasía popular. Sin embargo, el vicealmirante Dupont, conocido oficial de marina de gran experiencia, ha advertido que el público debería comprender que, en una guerra naval, los buques submarinos no tienen más misión que hacer peligroso para el enemigo el bloqueo de los puertos aliados. Nuestra ilustración muestra una sección longitudinal y una vista del buque en la costa de Tolón, tras habérsele añadido una torreta de mando para la navegación en superficie.»

MICROBIO DEL CÁNCER. «El *Figaro*, de París, anuncia que el doctor Bra ha descubierto el microbio del cáncer y que hay razones para esperar que ese descubrimiento podría no tardar en desembocar en un remedio seguro para tan espantosa enfermedad. En su informe Bra se manifiesta discreto y prudente; avisa que pasarán meses antes de que sea posible hacer una declaración definitiva. Sí ha podido ya aislar y cultivar un parásito procedente de un tumor canceroso y, con su inoculación, inducir cánceres en animales. El parásito, de tipo hongo, es el agente específico del cáncer. El doctor Bra lleva cuatro años estudiando el origen de la enfermedad.»

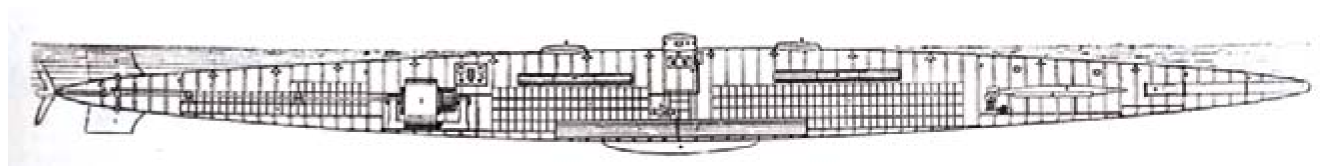
...ciento cincuenta años

ACELERACIÓN DEL COMERCIO MUNDIAL. «El buque *Sea Witch*, del capitán Robert Waterman, arribado a este puerto [Nueva York] la semana pasada procedente de Cantón, en el insólitamente corto espacio de 74 días y 14 horas, ha realizado, parece, una serie de travesías durante su camino de ida y vuelta, con una rapidez superior a las logradas hasta ahora por cualquier velero. Esas travesías equivalen a un viaje alrededor del mundo, que efectuó en 194 días de navegación.»

MENTES EN RUINAS. «El doctor W. H. Stokes, del Instituto Mount Hope para Dementes, afirma acerca de la locura moral: ‘Otra fuente fecunda de trastornos mentales de esta especie parece encontrarse en un indebido exceso en la lectura de los numerosos relatos novelísticos, que tanto han proliferado en la prensa durante los últimos años, y que tanto se han multiplicado por todas partes, con el efecto de viciar el gusto y corromper la moral de los jóvenes. Los padres nunca serán demasiado cautelosos a la hora de preservar a sus jóvenes hijas de esta perniciosa costumbre.’»



El nuevo torpedero submarino Gustave Zédé



Estrellas de rayos X superblandas y supernovas

Años atrás se descubría un nuevo tipo de estrella que emitía rayos X de una energía insólitamente baja. Ahora sabemos que se trata de enanas blancas, devoradoras de sus estrellas compañeras hasta terminar por estallar

Peter Kahabka, Edward P. J. van den Heuvel y Saul A. Rappaport

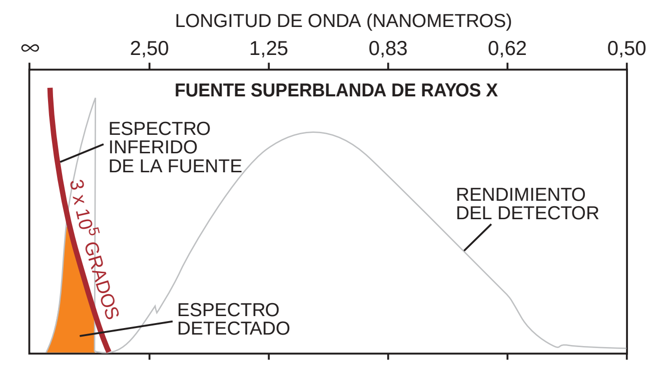
1. UN DAVID Y UN GOLIAT ESTELARES trenzan un sistema binario simbiótico: una enana blanca y una estrella gigante roja, en órbita una alrededor de otra. La enana, con su intensa gravedad, va engullendo las capas exteriores de la gigante. El gas hurtado termina en un disco de acreción que rodea a la enana, hasta que acaba por asentarse en su superficie, donde puede encender la fusión nuclear y generar abundante cantidad de rayos X de baja energía.

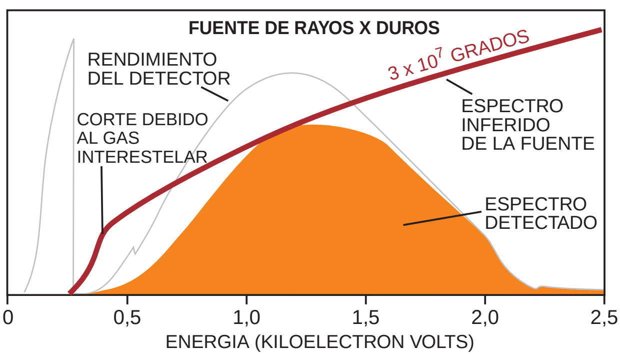
Desde los años treinta se sabe que las estrellas brillan por las reacciones de fusión nuclear que se producen en sus entrañas. Sin ir más lejos, en el núcleo del Sol se fusionan 600 millones de toneladas de hidrógeno por segundo para crear helio. El proceso libera energía en forma de rayos X y gamma, que se abren lento paso hacia el exterior a través de espesas capas de gas. Para cuando la radiación arriba a la superficie del astro se ha degradado en luz visible.

Pero hace poco se ha descubierto una nueva clase de estrellas en las que la fusión nuclear no se produce en las profundidades, sino en las capas exteriores, bajo la superficie mismo. Manifiestan ser enanas blancas —estrellas densas, consumidas ya, agotado su combustible nuclear— que giran alrededor de estrellas comunes. Las enanas roban gas de hidrógeno a sus compañeras, lo agregan a su propia superficie y reanudan la fusión. La consecuencia es un torrente de rayos X con un intervalo de longitudes de onda "blandas", distintivo de tales estrellas, a las que se ha dado en llamar "fuentes luminosas superblandas de rayos X". Por esa vía, el peso de las enanas blancas aumenta hasta que llega un momento en que se vuelven inestables y, entonces, o se desploman convertidas en una estrella de neutrones más densa o estallan.

Desde tiempo atrás se viene sugiriendo la hipótesis según la cual la desestructuración de una enana blanca sería la causa de cierta explosión de supernova, la de tipo Ia. Gracias al descubrimiento de las fuentes superblandas se ha identificado una clase de sistema estelar que explosiona de idéntica forma. Las supernovas del tipo Ia han adquirido interés por su función de "candelas estándar" brillantes para medir la lejanía de galaxias remotas y, por ende, la velocidad de la expansión cósmica. Buena parte de la pertinaz incertidumbre en las evaluaciones de la edad y de la velocidad de la expansión del universo guarda relación con nuestro desconocimiento del origen de tales supernovas. En las fuentes superblandas podría esconderse el anhelado eslabón perdido.

El capítulo de las fuentes superblandas se abrió con el lanzamiento del satélite de rayos X alemán ROSAT en 1990. Este observatorio orbital acometió el primer rastreo exhaustivo del cielo en las longitudes de onda de los rayos X blandos, una forma de radiación electromagnética que cae entre la luz ultravioleta y los rayos X "duros". Se trata de longitudes entre 50 y 1000 veces menores que las de la luz visible; la energía de sus fotones (la unidad que prefieren los astrónomos de rayos X) va de los 0,09 a los 2,5 kiloelectronvolts (keV). Los rayos X duros tienen energías de hasta unos cientos de keV. Con la excepción del Observatorio Einstein de la NASA, que cubría el intervalo de energías entre los 0,2 y los 4,0 keV, los satélites que le habían precedido se habían centrado en los rayos X duros.



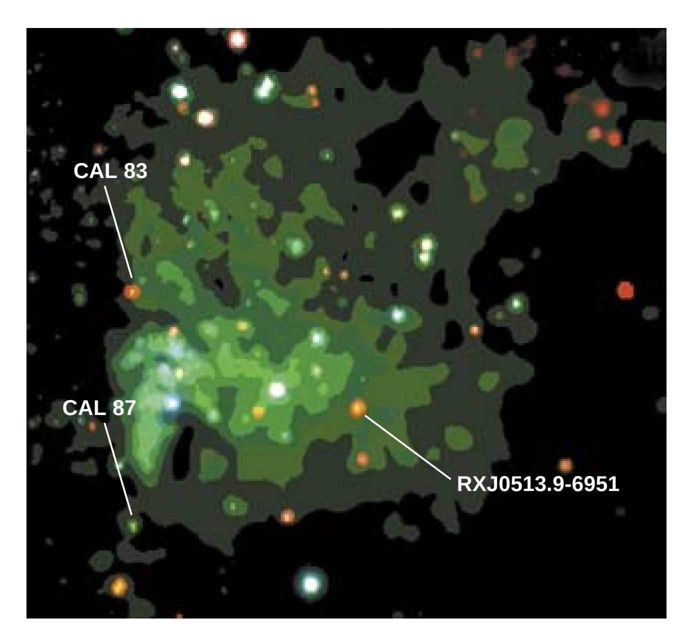


2. LAS FUENTES DURAS de rayos X se distinguen de las fuentes blandas por sus espectros, tal y como midió el observatorio ROSAT. Una fuente superblanda típica (*arriba*) emite rayos X de una energía bastante baja, indicativa de una temperatura, poco elevada en comparación, de 300.000 grados. Una fuente de rayos X duros (*abajo*) es cien veces más caliente y emite, por ende, rayos X de gran energía. En ambos casos el espectro intrínseco de la fuente (*curvas rojas*) está distorsionado por la respuesta del detector del ROSAT (*curvas grises*) y por absorción de gas interestelar.

Muy pronto, el equipo del ROSAT, dirigido por Joachim Trümper, se fijó en ciertos objetos peculiares de la Gran Nube de Magallanes, galaxia satélite de la Vía Láctea. Emitían rayos X a una velocidad prodigiosa —de 5000 a 20.000 veces la generación total de energía por el Sol— y, sin embargo, su espectro era inesperadamente blando. Las fuentes de rayos X acostumbran generar espectros duros, con el pico de energía entre 1 y 20 keV, producidos por gases a temperaturas de 10 a 100 millones de kelvins. Esas fuentes de rayos X duros son estrellas de neutrones y agujeros negros que están devorando a sus compañeras estelares. Pero los espectros blandos de las nuevas estrellas —cuyos fotones tenían energías de una centésima de los de esas otras fuentes de rayos X— indicaban que sus temperaturas eran de sólo unos cientos de miles de kelvins. En una imagen de rayos X coloreada se las ve rojas, mientras que las fuentes de rayos X clásicas salen azules.

La culpa de no haber reconocido en las fuentes superblandas una clase distinta de estrellas hemos de achacarla a los detectores de rayos X hasta entonces empleados, menos sensibles a las energías bajas. Tras los hallazgos del ROSAT, se removieron los archivos y se comprobó que se habían descubierto ya dos fuentes hacía diez años. Fue con el Observatorio Einstein y las halló el equipo de Knox S. Long. Con los nombres de CAL 83 y CAL 87, estaban clasificadas en la misma categoría que otras fuentes intensas de la Gran Nube de Magallanes, aunque los astrónomos notaron que mostraban unos espectros insólitamente blandos.

Por entonces, el grupo de Anne P. Cowley lanzó la idea de que CAL 83 y 87 pudieran ser agujeros negros en acreción, cuyo espectro es a menudo más blando que el obtenido de estrellas de neutrones. Al descubrirse, en los años ochenta, estrellas débiles en ambas fuentes la sospecha arraigó. El brillo de las





3. IMAGEN DE RAYOS X COLOREADA (*a la izquierda*) para ilustrar cómo vería quien tuviese ojos de rayos X una minigalaxia cercana, la Gran Nube de Magallanes. El color rojo indica una radiación de una energía menor (o, lo que es equivalente, una longitud de onda mayor); el azul significa una energía mayor (una longitud de onda menor). Las fuentes superblandas destacan como puntos rojos o naranjas, mientras que las de rayos X duros salen azules. La estrella superblanda CAL 87 parece verde porque una nube interpuesta de hidrógeno altera su verdadero color. (Algunos puntos rojos son, en realidad, estrellas de tipo solar presentes en primer plano.) La vista en rayos X difiere bastante de una fotografía ordinaria de la misma región (*a la derecha*).

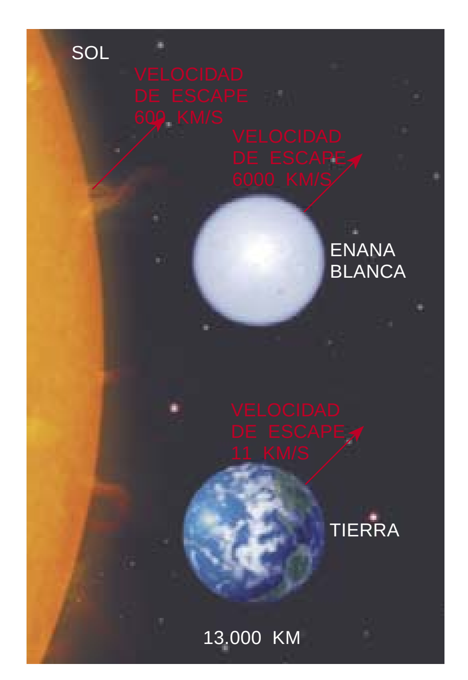
estrellas oscilaba, signo revelador de la presencia de un sistema binario (donde una estrella gira alrededor de la otra). En el curso de una campaña internacional de observación dirigida por Alan P. Smale, se halló en 1988 que el brillo de CAL 83 fluctuaba con un período de apenas más de un día. Un proyecto similar, dirigido por Tim Naylor, obtuvo que el período de CAL 87 era de 11 horas. Esas estrellas compañeras visibles eran el combustible de los hipotéticos agujeros negros. Pesaban, según las diversas mediciones y suponiendo que todavía no estaban esquilmadas, entre 1,2 y 2,5 veces lo que el Sol.

Pero las observaciones del ROSAT minaron la credibilidad de la hipótesis. Las fuentes eran mucho más frías que cualquier sistema con agujero negro. Además, su brillo y temperatura revelaban su tamaño. Por física básica sabemos que cada unidad de área de una superficie radia una cantidad de energía proporcional a la cuarta potencia de su temperatura. Dividiendo la emisión total de la estrella por esa cantidad se calcula su superficie y, suponiendo que sea esférica, su diámetro. Resulta que los de CAL 83, CAL 87 y otras fuentes de la Nube de Magallanes miden entre 10.000 y 20.000 kilómetros, que es el tamaño de una estrella enana blanca. Tales objetos multiplican, pues, 500 o 1000 veces el tamaño de una estrella de neutrones o el del "horizonte" en el borde de un agujero negro cuya masa sea de orden estelar. Cuando Trümper habló de las fuentes superblandas en un congreso celebrado en el Instituto de Física Teórica de Santa Bárbara en enero de 1991, varios asistentes hicieron rápidamente este cálculo, como quien dice, en la vuelta de la hoja.

Algunos participantes, Jonathan E. Grindlay entre ellos, sugirieron que las fuentes eran enanas blancas que emitían rayos X conforme rompían olas de gas contra su superficie, a la manera en que las fuentes de rayos X duras se originan por acumulación de materia sobre una estrella de neutrones o en un agujero negro. Trümper, Jochen Greiner, Günther Hasinger, Nikolaos D. Kylafis y Kiriaki M. Xilouris se decantaron por estrellas de neutrones; propusieron que las fuentes eran estrellas de neutrones que habían acumulado una cubierta gaseosa de unos 10.000 kilómetros de espesor. En ambos enfoques la fuente de energía era, en última instancia, de tipo gravitatorio. La gravedad atraía la materia hacia la estrella enana o neutrónica; la energía del movimiento se convertía en calor y radiación durante las colisiones sobre la superficie estelar o dentro del gas.

Ambos modelos merecían un estudio más hondo. Van den Heuvel y Rappaport, firmantes de este artículo, contando con Dipankar Bhattacharya, lo emprendieron de inmediato. No tardamos en ver que ninguno de los modelos valía. Las fuentes superblandas emiten una energía similar a las más brillantes estrellas de neutrones acumuladoras de materia en un sistema binario. Sin embargo, las colisiones del gas son, como proceso generador de energía, de 500 a 1000 veces más eficaces sobre las estrellas neutrónicas que sobre las enanas blancas: el efecto de la gravedad en la superficie de una estrella de neutrones es todas esas veces mayor. (Para cuerpos de la misma masa, la energía gravitatoria disponible es inversamente proporcional al radio del cuerpo.) Así, para que una enana igualase la emisión de una estrella de neutrones había de barrer materia de 500 a 1000 veces más deprisa. Con un flujo de acumulación tan frenético —equivalente a varias veces la masa de la Tierra por año— el material que caería sería tan denso, que absorbería todos los rayos X.

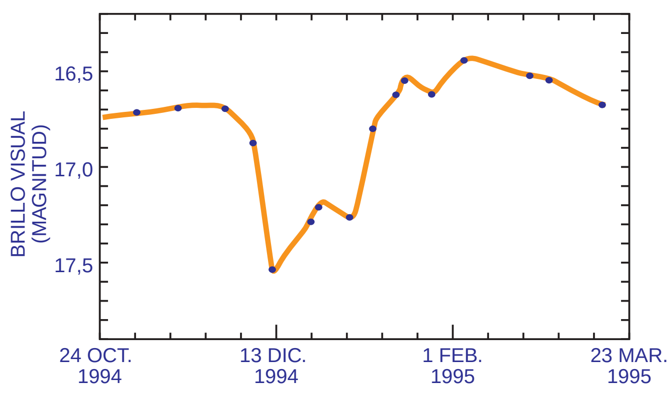
La tesis de las estrellas de neutrones con cubiertas gaseosas no estaba exenta de problemas. Un envoltorio de gas enorme (ingente con respecto al radio de 10 kilómetros de la estrella de neutrones) sería inestable; o

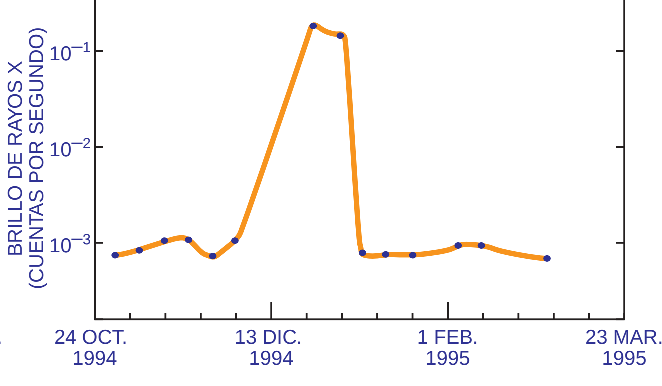


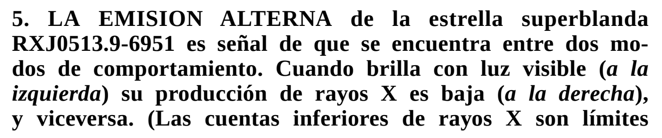




4. LAS ESTRELLAS COMPACTAS tienen unas velocidades de escape enormes. Una enana blanca típica (*a la izquierda*) encierra la masa del Sol en el volumen de un planeta como la Tierra. Para liberarse de su gravedad, un objeto ha de moverse a unos 6000 kilómetros por segundo; tal es, aproximadamente, la velocidad que un cuerpo que hiciera el viaje al revés —que cayese sobre la enana— llevaría en el momento del impacto. Estrellas más densas de la misma masa, como las de neutrones (*en el centro*), retienen los cuerpos con fuerza incluso mayor. La estrella más densa posible, un agujero negro, está definida por una superficie, u "horizonte", cuya velocidad de escape es la de la luz (*a la derecha*).







5. LA EMISION ALTERNA de la estrella superblanda RXJ0513.9-6951 es señal de que se encuentra entre dos modos de comportamiento. Cuando brilla con luz visible (*a la izquierda*) su producción de rayos X es baja (*a la derecha*), y viceversa. (Las cuentas inferiores de rayos X son límites superiores.) La estrella se halla en la frontera entre una fuente superblanda (que emitiría sólo rayos X) y una enana blanca rodeada por un gas espeso (que sólo emitiría luz visible). Las ligeras fluctuaciones de la velocidad de toma de gas hacen que la estrella pase de un comportamiento al otro.

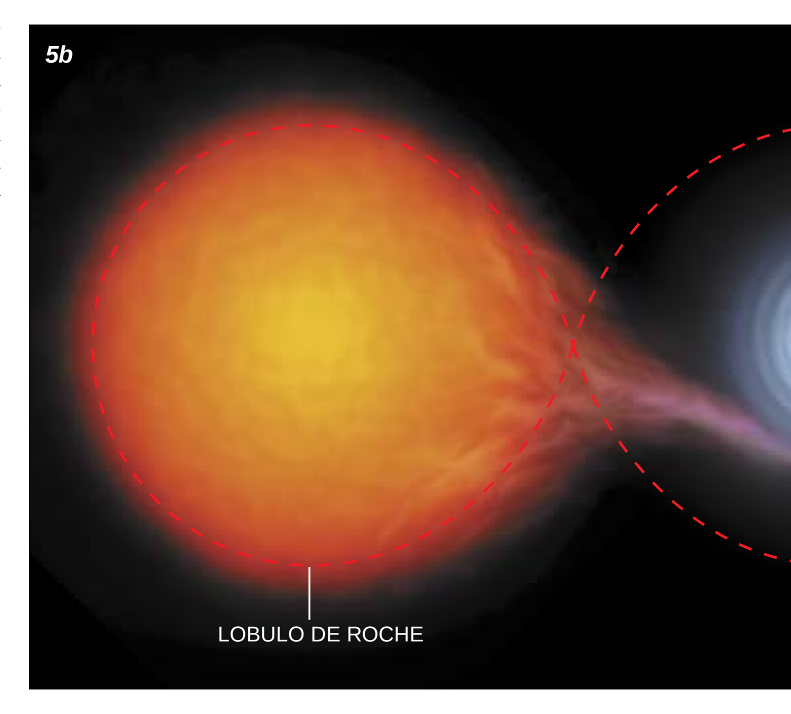
se derrumbaría o se dispersaría en segundos o minutos. Pero CAL 83 y CAL 87 llevan brillando desde hace diez años, por lo menos. Y la nebulosa de gas interestelar ionizado que rodea a CAL 83 tardó decenas de miles de años en crearse.

Tras semanas de analizar y evaluar modelos, ninguno de los cuales funcionaba, nos dimos cuenta de cuál era la diferencia crucial entre la acumulación de material sobre las estrellas de neutrones o en los agujeros negros y la acumulación sobre las enanas blancas. Aquélla genera mucha más energía que la fusión nuclear de la misma cantidad de hidrógeno, mientras que ésta produce mucha menos. De la energía inherente a la masa (la famosa ecuación de Einstein $E = mc^2$), la fusión libera un 0,7 por ciento. Pero la acreción sobre una estrella de neutrones libera más de un 10 por ciento; en un agujero negro, antes de que el material desaparezca en él, hasta el 46 por ciento. Por contra, la acumulación sobre una enana blanca, con su gravedad más débil, desprende sólo un 0,01 por ciento de la energía inherente.

Por tanto, la fusión nuclear puede resultar en las enanas blancas más potente que la acumulación. Si el hidrógeno se acumulase en la superficie de una enana blanca y por alguna razón empezase a "quemarse" (es decir, a experimentar una fusión), se requeriría sólo al año un 0,03 de la masa de la Tierra para generar la luminosidad de rayos X observada. Por ser menor la densidad de la materia entrante, los rayos X podrían escapar.

La combustión nuclear estable de la materia que cayese explicaría el brillo paradójico de las fuentes superblandas. Pero, ¿era realmente posible algo así? Aquí tuvimos suerte. Mientras buscábamos respuesta se presentó en Santa Bárbara Ken'ichi Nomoto. Este profesor de Tokyo había intentado ya despejar ese mismo interrogante, mas para entender otro fenómeno, las explosiones de nova, estallidos de mucha menor energía que las supernovas que hacen que la estrella brille de pronto 10.000 veces más, si bien no la destruyen. Las novas se producen siempre en binarias cercanas formadas por una enana blanca y una estrella de tipo solar. Hasta el descubrimiento de las fuentes superblandas eran las únicas binarias ceñidas que se conocían.

A lo largo de diez años Nomoto y otros habían venido mejorando las simulaciones primerizas de Bohdan Paczyński y de Anna Żytkow. Confirmaban sus análisis que el hidrógeno asentado sobre la superficie



6. EL CICLO VITAL de una estrella superblanda (*secuencia de arriba)* empieza en un sistema binario de estrellas desigual; termina en una explosión de supernova del tipo Ia. Según la naturaleza de la estrella compañera, la fase superblanda adquirirá, de entre tres formas posibles, una. Si la estrella en cuestión es ordinaria y la órbita ceñida, rebosará de su lóbulo de Roche y cederá el control de sus partes externas a la enana blanca. Se representa este caso en el quinto cuadro de la secuencia (*5a*). Los diagramas inferiores muestran las restantes posibilidades. Si la compañera es una estrella gigante roja de talla suficiente, desbordará también su lóbulo de Roche (*5b*). Por último, si es una gigante roja de menor tamaño o con una órbita más amplia, podría alimentar una fuente superblanda con sus fuertes vientos (*5c*). No todas las fuentes superblandas estallan, pero con las que lo hacen basta para explicar la frecuencia observada de supernovas.

podía entrar en combustión. El mecanismo seguido dependería de la tasa de acreción; si baja, de menos de 0,003 masas terrestres por año, la fusión será espasmódica. El hidrógeno recién incorporado permanece pasivo, a menudo durante miles de años, hasta que la masa acumulada supera determinado valor crítico; en ese momento se producirá bruscamente la ignición de la base del hidrógeno acumulado. La consiguiente explosión termonuclear se verá como una nova.

Si la velocidad de acreción es un poco mayor, la fusión será cíclica, pero no explosiva. Con el aumento de dicha velocidad, se irá acortando el intervalo entre ciclos de combustión hasta que, pasado determinado valor umbral, se establezca una combustión estable. Para las enanas blancas de masa solar, el umbral se fija en unas 0,03 masas terrestres al año. En las simulaciones, la fusión genera exactamente la luminosidad de rayos X blandos observada en las fuentes superblandas.

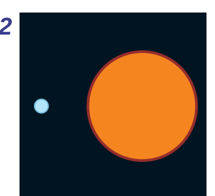
Si el ritmo de acreción es mayor, de unas 0,12 masas terrestre al año, el gas que cae no se asentará sobre la superficie, sino que formará una envoltura extensa en torno a la enana. En la superficie proseguirá la combustión incesante, pero la envoltura, espesa, degradará los rayos X y los convertirá en luz ultravioleta y visible. A tenor de recientes cálculos, la radiación alcanza tal intensidad, que ejerce una presión centrífuga sobre el gas de la envoltura, provocando que una parte de ésta se aleje de la estrella en forma de viento estelar.

Si la velocidad de acreción es de unas 0,12 masas terrestres al año, el sistema podrá alternar entre una fase de rayos X y otra visible. Tal es el comportamiento manifestado por la fuente superblanda RXJ0513.9-6951, descubierta por Stefan G. Schaeidt. Desprende rayos X durante semanas y descansa varios meses. Esta emisión alternante desconcertó a los astrónomos. Hasta que en 1996 el equipo oxoniense de Karen A. Southwell se percató de que la estrella visible asociada a esta fuente fluctuaba también. Cuando la estrella visible es débil, la fuente de rayos X luce, y al revés. El sistema posee, además, dos chorros veloces de materia que manan en direcciones opuestas a una velocidad estimada de 4000 o 6000 kilómetros. Son los chorros habituales cuando un disco de acreción vierte más materia en la estrella de la que ésta puede absorber. Lo que sobra sale despedido en sentido perpendicular al disco, por donde no hay materia que caiga y lo bloquee. Se espera que la velocidad a la que mana el chorro sea la misma que la de escape de la superficie de la estrella. En RXJ0513.9-6951 la velocidad inferida casi es igual a la de escape de una enana blanca, en confirmación de la naturaleza de enana blanca que atribuimos a las fuentes superblandas.

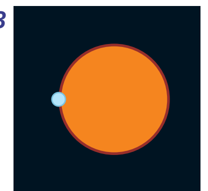
No todos los sistemas binarios pueden aportar material a la velocidad necesaria para producir una fuente superblanda. Si la estrella compañera tiene una masa menor que la enana blanca, fenómeno característico de



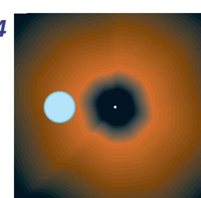
Par de estrellas corrientes que queman hidrógeno en su nucleo



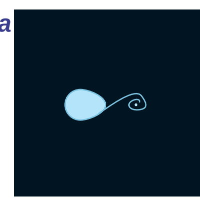
Una agota el combustible del núcleo; se vuelve gigante roja



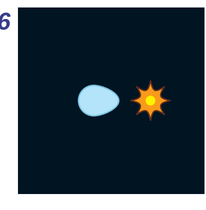
La órbita se estrecha; la gigante envuelve a la otra estrella



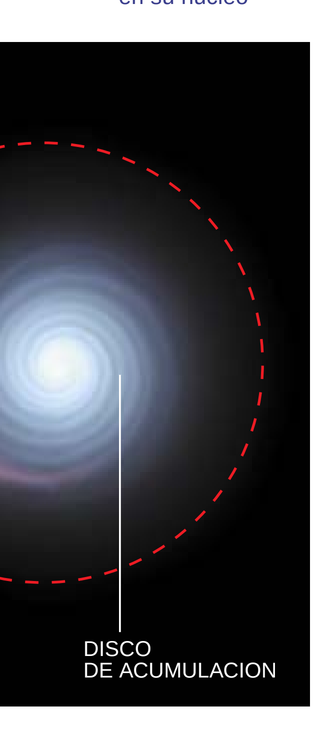
La gigante se desprende de sus capas exteriores; se convierte en enana blanca

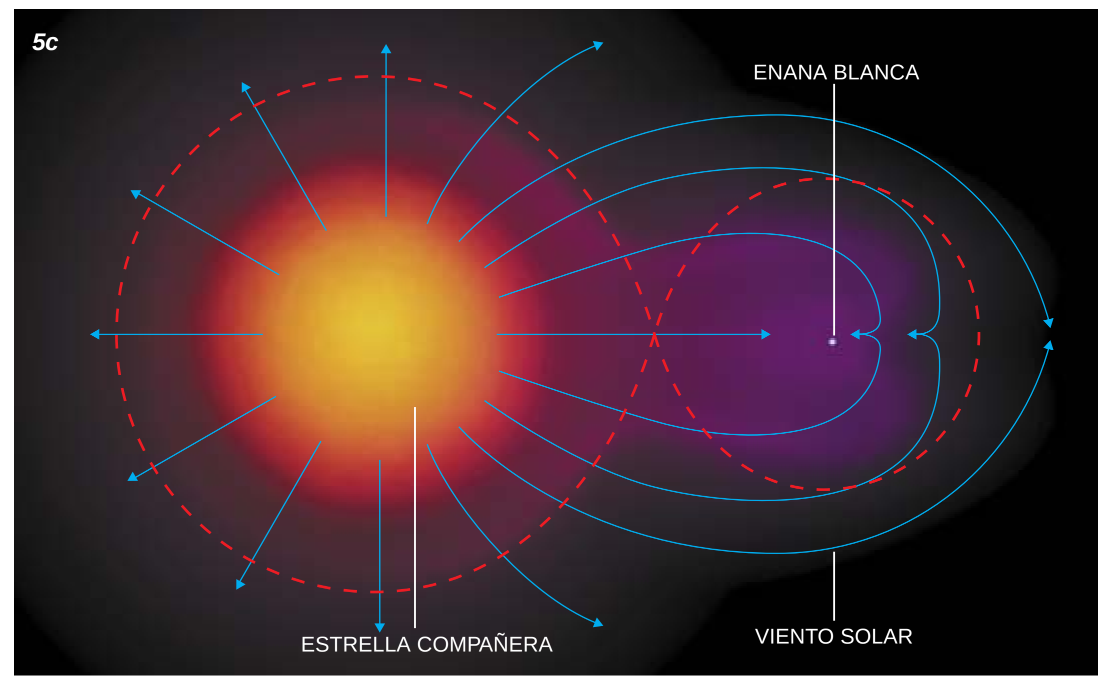


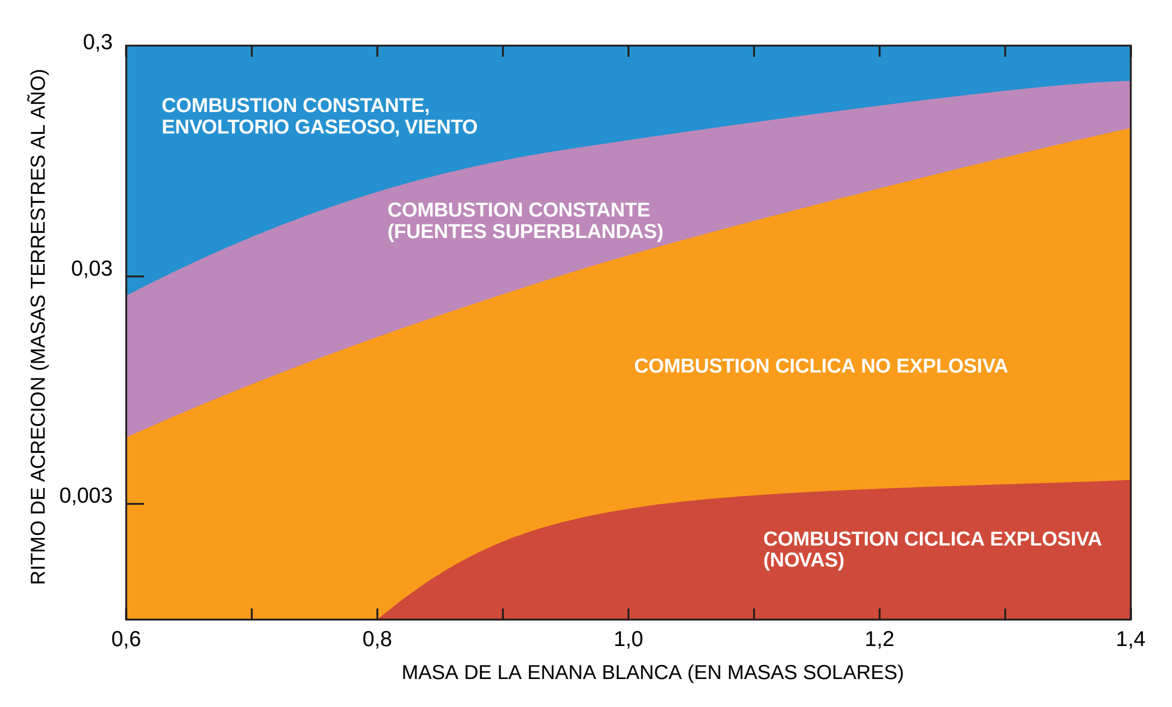
La enana roba gas a la otra estrella; emite rayos X blandos



La enana alcanza la masa crítica; estalla







7. EL ESTILO DE FUSION NUCLEAR seguido en la superficie de una enana blanca dependerá de la masa que tenga (*eje horizontal*) y de la velocidad con que devore a la estrella compañera (*eje vertical*). Si la tasa de acreción es baja, la fusión (que los astrónomos, induciendo un tanto a confusión, llaman "combustión") ocurrirá a golpes, suave o explosivamente; en caso contrario, será continua. Esta gráfica muestra que novas y fuentes superblandas, fenómenos antaño considerados distintos, guardan, sin embargo, una relación estrecha.

sistemas productores de novas, no podrá caer materia a más de 0,03 masas terrestres al año. Este límite viene impuesto por la ley de conservación del momento angular orbital. Conforme la compañera pequeña pierde masa, su órbita se ensancha y la velocidad del flujo se estabiliza.

Para que el ritmo de acreción sea más célere, la estrella donante ha de tener una masa mayor que la enana. La conservación del momento angular hará entonces que la órbita se contraiga a causa de la transferencia de masas. Las estrellas se acercarán tanto, que se producirá un tira y afloja gravitatorio por el control de las capas externas de la donante. El material incluido en el "lóbulo de Roche" seguirá dominado por la gravedad de la donante; la enana se llevará el que trascienda esa zona. Pervertida, la donante da alas a su propia destrucción. Mientras pierde masa por la superficie, la cantidad de energía que la fusión genera en el núcleo apenas varía. El continuo calentamiento desde abajo ejerce una presión sobre las capas exteriores y se restaura la forma de la estrella. Esta presión reemplaza la materia robada por la enana. La situación sólo se estabilizará cuando el núcleo sienta los efectos de la pérdida de masa. Para una estrella que tuviese en un principio dos masas solares, la vuelta al equilibrio —y por tanto el final de la emisión superblanda— sólo se producirá siete millones de años después del comienzo del saqueo. Para entonces la estrella se habrá quedado en una quinta parte de su masa inicial, transformada en la menor del sistema. La tasa media de acreción era de unas 0,04 masas terrestres al año.

Al hilo de esta argumentación, predijimos en 1991 que muchas fuentes superblandas serían enanas blancas que describían órbitas ceñidas (con períodos de menos de unos cuantos días) alrededor de una estrella compañera cuya masa original fuera de 1,2 a 2,5 masas solares. Y CAL 83 y 87 son, en efecto, dos sistemas así. Desde 1992 se han medido los períodos orbitales de otras cuatro fuentes superblandas; ninguno pasaba de unos pocos días. La explicación podría aplicarse también a una clase de sistemas binarios similares a las novas, las estrellas V Sagittae, cuyo brillo oscilante sigue dejando perplejos a los astrónomos desde principios de siglo. En 1998, el equipo de Joseph Patterson, por un lado, y João E. Steiner y Marcos P. Díaz, por otro, mostraron que el prototipo de esta clase presentaba la masa y el período orbitales apropiados.

Hay otro grupo más de estrellas que podría dar lugar a fuentes superblandas: las binarias simbióticas. En éstas, la enana blanca describe una órbita amplia alrededor de una estrella gigante roja. Las gigantes rojas se hallan prestas a donar materia. Hinchadas por la edad, la gravedad reinante en su superficie es bastante débil; descargan materia en forma de grandes vientos estelares. En 1994 Kahabka, coautor de este artículo, Hasinger y Wolfgang Pietsch descubrieron una binaria simbiótica superblanda en la Pequeña Nube de Magallanes, galaxia también satélite de la Vía Láctea. Desde entonces se han encontrado media docena más.

Cuesta reconocer ciertas fuentes superblandas porque su velocidad de acreción varía con el tiempo. Una fuente de nuestra galaxia alterna entre la emisión de rayos X y la de luz visible con un ciclo de 40 años, según podemos confirmar en los archivos de placas fotográficas. Hay objetos, Nova Muscae 1983 y Nova Cygni 1992 por ejemplo, que combinan un comportamiento de nova con una emisión superblanda; lo entenderemos si les asignamos un período de varios años de "poscombustión" tranquila entre las erupciones.

Las masas que las fuentes superblandas de período orbital corto exigen a sus compañeras indican que nos

PETER KAHABKA, EDWARD P. J. VAN DEN HEUVEL y SAUL A. RAPPAPORT afirman que jamás imaginaron que las enanas blancas encerrasen la llave de las fuentes superblandas. Por puro accidente se descubrió que lo eran, en el curso de un seminario que Van den Heuvel y Rappaport habían organizado sobre estrellas de neutrones. Más tarde se les unió Kahabka, que había descubierto muchas de las fuentes superblandas mientras colaboraba en el equipo del ROSAT. Kahabka se halla adscrito al Instituto Astronómico de la Universidad de Amsterdam, que dirige Van den Heuvel. Rappaport enseña física en el Instituto de Tecnología de Massachusetts.

hallamos ante sistemas jóvenes (en comparación con la edad de nuestra galaxia). Las estrellas con esa masa inferida viven unos miles de millones de años, como mucho, y se encuentran siempre en el joven plano central de la galaxia o cerca de él. Por desgracia, esa localización las sitúa en una región rica en nubes interestelares que bloquean los rayos X blandos. De lo que se infiere que la población observada sea sólo la punta del iceberg. Extrapolando a partir del número conocido de fuentes superblandas, hemos calculado que el número total en nuestra galaxia es en todo momento de varios miles. Cada mil años nacen unas y mueren otras, pocas en ambos procesos.

¿Qué pasa cuando fenecen? Con la fusión de la materia que reciben de la compañera, crece la masa de la enana blanca. Podría llegar al límite de Chandrasekhar de 1,4 masas solares, lo máximo que una enana blanca puede tener. Superada esa frontera, no bastan las fuerzas cuánticas que la sostienen. Según cuales sean la composición inicial y la masa de la enana caben dos resultados: el desplome engendrador de una estrella de neutrones o la destrucción en una explosión nuclear. Las enanas que carecen de carbono o que tenían en un principio más de 1,1 masas solares se desploman. Los teóricos Ramón Canal, Javier Labay, Jordi Isern, Stan E. Woosley, Frank Timmes, Hitoshi Yamaoka y Nomoto han analizado ese sino.

Las enanas blancas que no cumplen ninguno de esos criterios estallan, lisa y llanamente. Pueden ir amasando helio poco a poco hasta que llegan al límite de Chandrashekar y explotan. En un curso alternativo, la capa de helio alcanza prematuramente una masa crítica y genera su propia ignición explosiva. En esta segunda hipótesis, las ondas de choque sacuden la estrella y producen la ignición del carbono del núcleo. En cuanto empieza la combustión del carbono, se desencadena un proceso desbocado en el material, denso y sometido a tensión, de la enana. En unos segundos la estrella se convierte en níquel y otros elementos (silicio y hierro). En menos de un año, el níquel dispersado por el espacio se desintegra radiactivamente en cobalto y, luego, en hierro.

Pero los astrónomos habían ya atribuido un tipo de explosión a la muerte de las enanas ricas en carbono: las supernovas del tipo Ia. El espectro de éstas carece de toda señal de hidrógeno o de helio; ése es uno de los factores que las distinguen de otros tipos de supernovas (Ib, Ic y II), creadas seguramente por la implosión y subsiguiente explosión de estrellas dotadas de gran masa. Se cree que las supernovas del tipo Ia constituyen una fuente principal de hierro y de los elementos de su familia, en el universo y en la Tierra. Supernovas que se producen a razón de cuatro cada mil años en galaxias como la nuestra.

Antes de que se descubriesen las fuentes superblandas se ignoraba la secuencia precisa de sucesos que engendraba las supernovas de tipo Ia. Se aducían ciertas estrellas simbióticas —en particular las novas recurrentes— o se apelaba a la unión en una de dos enanas blancas ricas en carbono. Esta segunda explicación ha quedado en entredicho. Nunca se ha visto un sistema doble de enanas blancas con la masa y el período orbital necesarios. Los cálculos recientes de Nomoto y Hadeyuki Saio han mostrado que una unión así sería demasiado pacífica para producir una explosión termonuclear. Las fuentes superblandas y otras enanas en cuya superficie se quema materia podrían ser la solución. El número de muertes de estas estrellas por unidad de tiempo viene a coincidir con el ritmo observado de aparición de supernovas. La concordancia hace que las fuentes binarias luminosas de rayos X superblandas sean la primera clase de objetos sólidamente identificados como candidatos para acabar su vida transformados en supernovas del tipo Ia.

Apoyados en esa convicción, podría mejorarse la precisión de las mediciones cosmológicas que se basan en tales supernovas para determinar las distancias. Toda la diferencia entre una conclusión sobre el origen y el destino del universo y otra opuesta a ella puede estribar en sutiles variaciones de brillo. Los cosmólogos siempre andan sospechando de que pequeños errores sistemáticos —fruto quizá de un conocimiento incompleto de las estrellas que acaban como supernovas— reflejen variaciones reales. Pero queda todavía por estudiar el efecto que los descubrimientos en torno a las fuentes superblandas puedan ejercer sobre la cosmología.

Cuando se las detectó por vez primera nadie imaginaba que la investigación ulterior terminaría por unificar tantos fenómenos en una teoría coherente. Lo que antaño constituía un surtido abrumador de estrellas, novas y supernovas aparece hoy formando un conjunto de variantes de un sistema fundamental: una estrella común en órbita alrededor de una enana blanca reanimada. Las cosas se entienden así mucho mejor en el universo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LUMINOUS SUPERSOFT X-RAY SOURCES AS PROGENITORS OF TYPE IA SUPERNOVAE. Rosanne Di Stefano en *Supersoft X-ray Sources*, dirigido por Jochen Greiner. Springer-Verlag, 1996. Preprint disponible en xxx.lanl.gov/abs/astroph/9701199 en la World Wide Web.

LUMINOUS SUPERSOFT X-RAY SOURCES. P. Kahabka y E.P.J. van den Heuvel en *Annual Review of Astronomy and Astrphysics*, vol. 35, págs. 69-100. Annual Reviews, 1997.

SNEIA: ON THE BINARY PROGENITORS AND EXPECTED STATISTICS. Pilar Ruiz-Lapuente, Ramón Canal y Andreas Burkert en *Thermonuclear Supernovae*, dirigido por Ramón Canal, Pilar Ruiz-Lapuente y Jordi Isern. Kluwer, 1997. Preprint disponible en xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/9609078 en la World Wide Web.

TYPE IA SUPERNOVAE: THEIR ORIGIN AND POSIBLE APPLICATIONS IN COSMOLOGY. Ken'ichi Nomoto, Koichi Iwamoto y Nobuhiro Kishimoto en *Science*, vol. 276, páginas. 1378-1382, 30 de mayo de 1997. Preprint disponible en xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/p706007 en la World Wide Web.

Hipertensión en los afroamericanos

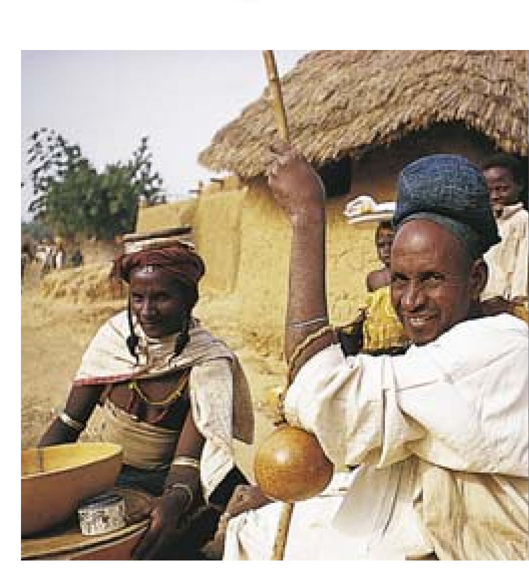
Richard S. Cooper, C. N. Rotimi y R. Ward

Casi todos los norteamericanos experimentan, con los años, un incremento persistente de la presión sanguínea. Cerca de una cuarta parte rebasa el dintel de hipertensión, término con el que nos referimos a una elevación crónica de la presión sanguínea. Esta afección contribuye de forma silenciosa a la enfermedad cardíaca, al *ictus* y a la insuficiencia renal; se la relaciona con unas 500.000 muertes anuales. La situación es más acuciante entre los afroamericanos: el 35 por ciento de ellos padece hipertensión. La afección, particularmente letal en esta población, se halla implicada en el 20 por ciento de las muertes entre los negros, una cifra que dobla la de los blancos.

La explicación al uso de esta disparidad entre negros y blancos atribuye a las personas de origen africano una "proclividad intrínseca" hacia la presión sanguínea elevada, en virtud de una genética vagamente definida. Semejante juicio, amén de no corresponderse con los datos observados, resulta inquietante. Deriva, en efecto, de una actitud ante las razas muy arraigada en la investigación en salud pública; prevención que, a veces, lleva a interpretaciones reduccionistas, al destacar la importancia de los rasgos raciales o genéticos. La raza se convierte en causa de la enfermedad, cuando en realidad se trata de una característica que engloba muchas





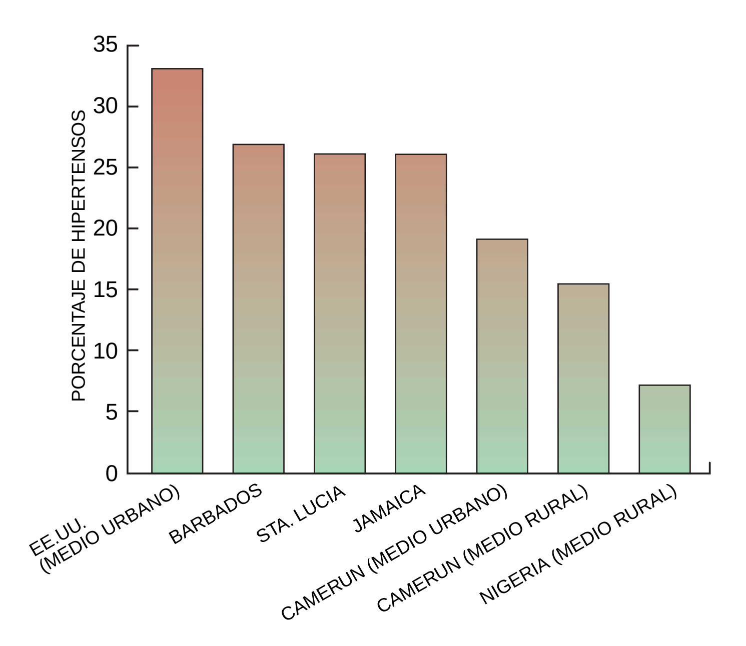


De la hipertensión arterial común entre los americanos de origen africano suele culparse a los genes. Ocurre, sin embargo, que, en Africa, tal hipertensión no se da. Nos encontramos ante un ejemplo óptimo de interacción entre genoma y entorno

otras variables que influyen en el desarrollo de la enfermedad, como por ejemplo las relacionadas con el nivel socioeconómico.

Estamos convencidos de que la superación de las hipótesis habituales relativas a la raza proporcionaría un enfoque más fructífero para entender la elevada prevalencia de hipertensión entre los afroamericanos. La hipertensión es un resultado al que se puede llegar por distintas vías: complejas interacciones entre factores externos (estrés o dieta), fisiología interna (sistemas biológicos que regulan la presión sanguínea) y genes implicados en la regulación de la presión de la sangre. Cuando se conozcan las interacciones entre estos tres elementos del modelo, comprenderemos los mecanismos por los que se desarrolla un aumento persistente de la tensión arterial. Los investigadores podrán luego replantearse con mayor éxito la cuestión de la alta prevalencia de este trastorno entre los afroamericanos y alcanzar mejores tratamientos para todos los pacientes.

Para descubrir la importancia proporcional de los diferentes factores ambientales, se podría mantener constante el acervo génico de una población y observar las variaciones de sus condiciones de vida o de su comportamiento en entornos distintos. No se puede llevar a cabo este tipo de experimento en con-









1. LA INCIDENCIA DE LA HIPERTENSION se ha estudiado en africanos y en norteamericanos y caribes descendientes de africanos. Se observa un progresivo descenso de la proporción de hipertensos desde los EE.UU., a través del Atlántico y hasta Africa (*gráfico*). La máxima diferencia se dio entre afroamericanos de medio urbano (*abajo, a la derecha*) y nigerianos de entorno rural (*abajo, a la izquierda*). Los hallazgos indican que la hipertensión puede ser, en buena medida, una enfermedad de la vida moderna y que los genes no bastan por sí solos para explicar la cifra de hipertensos entre afroamericanos.

Lo que significa la lectura de la presión

La presión sanguínea se mide con un esfigmomanómetro que proporciona dos resultados: la presión sistólica y la diastólica. La sistólica indica la presión máxima ejercida por la sangre en la pared de las arterias; aparece cuando el ventrículo izquierdo del corazón se contrae y empuja la sangre hacia las arterias. La presión diastólica mide la presión mínima sobre la pared de los vasos sanguíneos; aparece cuando el ventrículo izquierdo se relaja y se llena de sangre. La presión sanguínea normal ronda los 120 mm de mercurio para la sistólica y los 80 para la diastólica.



Muchas personas experimentan aumentos transitorios de su presión sanguínea, particularmente en situaciones de estrés. Cuando la presión sanguínea se mantiene de forma persistente por encima de 140/90 los médicos diagnostican hipertensión. La enfermedad se puede tratar con dietas especiales, regímenes de ejercicios y medicación.

diciones ideales, sobre todo, porque un gran número de americanos presenta, cuando menos uno, y frecuentemente varios, de los factores y las conductas de riesgo de la hipertensión: el sobrepeso, la dieta rica en sal, el estrés psicológico de larga duración, la inactividad física y el consumo excesivo de alcohol. Se puede establecer una analogía con la identificación de las causas de cáncer de pulmón en una sociedad en la que todo el mundo fuma. Sin un grupo de control formado por personas que no fumen, los investigadores nunca sabrán que el tabaco contribuye de forma determinante al cáncer de pulmón.

Una solución a este problema podría pasar por volver a Africa. En 1991, comenzamos un proyecto de investigación centrado en la diáspora, la emigración forzada de africanos occidentales ocurrida entre los siglos XVI y XIX. En este vergonzoso capítulo de la historia, los traficantes europeos de esclavos compraron y capturaron en la costa occidental de Africa diez millones de personas y las transportaron al Caribe y al continente americano, donde gradualmente se mezclaron con europeos y americanos nativos. Hoy en día sus descendientes habitan todo el hemisferio occidental.

Desde hace tiempo se sabe que la prevalencia de la hipertensión en las zonas rurales de Africa occidental es la menor del mundo, si dejamos de lado ciertos enclaves de la cuenca amazónica y del Pacífico Sur. Los norteamericanos y británicos descendientes de africanos occidentales, por contra, presentan una llamativa prevalencia, de las más altas del mundo. Esta discrepancia apunta a factores ambientales o conductuales, más que a factores genéticos, como causa fundamental del incremento de la tendencia a la hipertensión.

Para determinar las causas de hipertensión en estas poblaciones, instalamos centros de estudio en comunidades de Nigeria, Camerún, Zimbabwe, Santa Lucía, Barbados, Jamaica y los EE.UU. Con el proyecto en marcha, centramos nuestra atención en Nigeria, Jamaica y los EE.UU. Consideramos que los tres países nos permitirían, en cierta medida, captar los efectos médicos del desplazamiento de los africanos desde sus países de origen hacia occidente. Seleccionamos de forma aleatoria individuos de cada uno de esos sitios para determinar la prevalencia general de la hipertensión y de sus factores de riesgo (dieta rica en sal, obesidad o inactividad física).

Como era de esperar, se observaron importantes diferencias entre estas tres sociedades. En Nigeria se estudió, con la colaboración de la facultad de medicina de la Universidad de Ibadan, una comunidad rural del distrito de Igbo-Ora. La poligamia es allí una práctica frecuente y las familias son grandes y complejas; las mujeres tienen una media de cinco hijos. Los habitantes de Igbo-Ora, de complexión delgada, se ocupan en tareas agrícolas y ganaderas de subsistencia, exigentes desde el punto de vista físico, y siguen la dieta tradicional nigeriana, que se basa en arroz, tubérculos y fruta.

Las naciones del Africa subsahariana no suelen llevar registros de mortalidad o de esperanza de vida. Pero podemos suponer, a partir de estudios locales, que las infecciones, la malaria sobre todo, son la primera causa de muerte. Nuestra investigación puso de manifiesto que los habitantes de Igbo-Ora corren un riesgo anual de mortalidad de entre uno y dos por ciento, lo que se puede considerar alto comparado con cualquier referencia occidental. Los que alcanzan edades avanzadas acostumbran llegar bastante sanos. En particular, la tensión arterial no aumenta con la edad y, aunque se dan casos de hipertensión, éstos son raros. (Nos complace haber podido coordinar con el personal médico de la región el tratamiento de los pacientes a los que se diagnosticó hipertensión.)

En Jamaica, una economía industrial emergente con riesgo muy bajo de enfermedades infecciosas, las crónicas tienen, en cambio, una mayor prevalencia que en Nigeria. Nuestro equipo estableció su base de operaciones en Spanish Town, la antigua capital colonial de Jamaica. Con sus 90.000 habitantes, Spanish Town ofrece un corte transversal de la sociedad jamaicana. Se encargó del proyecto la unidad de investigación del metabolismo tropical de la Universidad de las Indias Occidentales en Mona Campus.

La estructura familiar de Jamaica ha evolucionado hasta apartarse del patriarcado africano. Existen numerosas unidades familiares, generalmente pequeñas y a menudo fragmentadas, gobernadas por las mujeres. El desempleo crónico ha favorecido la marginación de los hombres y ha minado su posición social. Son comunes las

RICHARD S. COOPER, CHARLES N. ROTIMI y RYK WARD vienen trabajando en el tema del artículo desde hace ocho años. Cooper, cardiólogo y experto en incidencia de la raza en la investigación biomédica, trabaja con Rotimi en la facultad de medicina de la Universidad Loyola de Chicago. Rotimi dirige en Nigeria, su país de origen, la investigación de campo del programa sobre diabetes e hipertensión financiado por la Universidad Loyola y el Instituto Nacional de Salud. Ward preside el Instituto de Antropología Biológica de la Universidad de Oxford.

labores exigentes desde el punto de vista físico. La dieta se compone de productos locales y otros modernos. A pesar de la pobreza generalizada, la esperanza de vida en Jamaica sextuplica la de los afroamericanos estadounidenses, debido a una menor tasa de enfermedad cardiovascular y de cáncer.

En EE.UU. trabajamos en el área metropolitana de Chicago, en la ciudad de Maywood, cuya población es mayoritariamente afroamericana. Muchos de sus ancianos nacieron en el sur, en Mississippi, Alabama o Arkansas. Con la emigración mejoraron situación económica y salud. El trabajo en la industria pesada, regulado por los sindicatos, ofrece mayores oportunidades a los hombres; las mujeres se han incorporado a la población activa en empleos de diversa categoría. La dieta es típicamente americana: rica en sal y grasas. La generación ahora en la edad adulta tardía ha disfrutado de incrementos sustanciales en la esperanza de vida, aunque el progreso ha sido desigual en los últimos diez años.

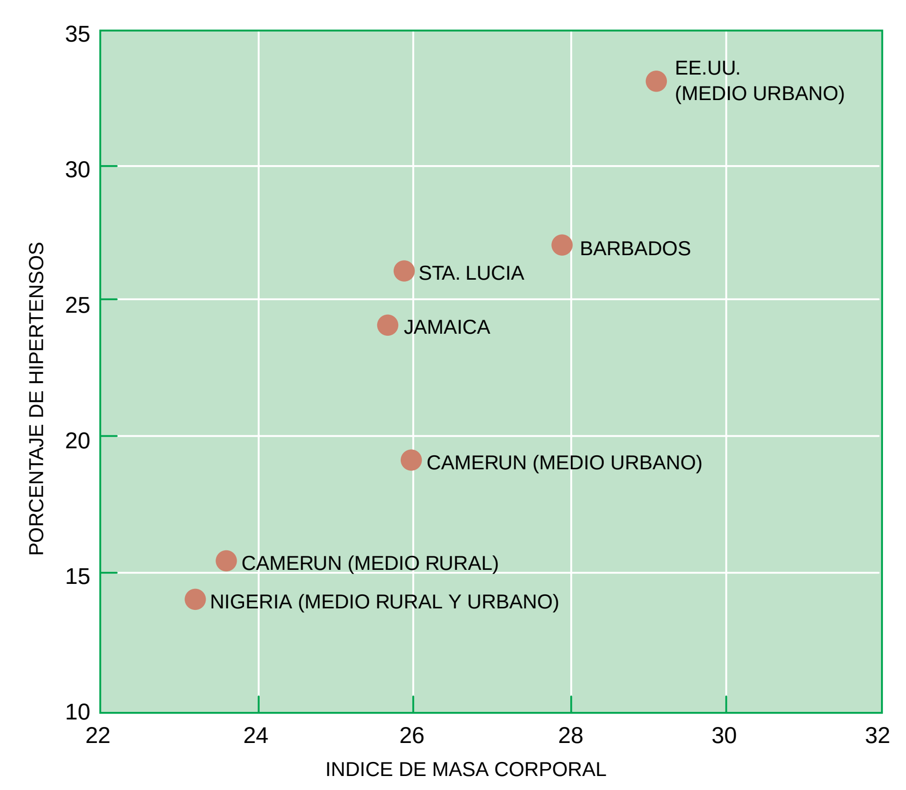
Antes de estudiar sociedades tan dispares, nos aseguramos de que los sujetos participantes presentaran una dotación genética similar. Hallamos que los afroamericanos y jamaicanos que participaron en el estudio compartían con los nigerianos un promedio del setenta y cinco por ciento de su herencia genética. Este bagaje genético común contrastaba con importantes diferencias.

Consideremos en primer lugar la prevalencia de la hipertensión entre los participantes. En Nigeria, sólo un siete por ciento de la población rural presentaba hipertensión, observándose un incremento en el área urbana. Alrededor del 26 por ciento de los negros de Jamaica y del 33 por ciento de los estadounidenses padecían hipertensión o se medicaban para controlarla. Algunos factores de riesgo de la hipertensión adquirían mayor frecuencia conforme nos deslizábamos a occidente. De Africa a los EE.UU. se registraba un incremento persistente en la ingesta de sal y en el índice de masa corporal, una medida que relaciona el peso con la altura. El análisis de estos datos indica que el sobrepeso, la falta de ejercicio y una dieta pobre podrían justificar entre el 40 y el 50 por ciento del incremento de hipertensión de los afroamericanos en comparación con los nigerianos. Se supone que las variaciones en la ingesta diaria de sal fomentan también el riesgo.

La diáspora africana ha demostrado resultar una potente herramienta para evaluar los efectos que los cambios sociales y ambientales pueden provocar sobre un bagaje genético estable. Se plantea, asimismo, la cuestión de si el incremento de la tensión arterial es un riesgo inevitable de la vida moderna, independientemente del color de la piel. El sistema cardiovascular humano evolucionó en un medio, el Africa rural, donde la obesidad es infrecuente, moderada la ingesta de sal, baja en grasas la dieta y elevada la actividad física requerida. La vida de subsistencia en Africa no ha cambiado mucho, al menos en estos aspectos. Hemos observado que la tensión arterial de las personas que viven en tales condiciones no aumenta con la edad y que la aterosclerosis es una afección casi desconocida. Los campesinos africanos constituyen, pues, un interesante grupo de control con el que los epidemiólogos pueden comparar poblaciones de sociedades industriales.

Una variación de estas condiciones basales, moderada incluso, produce cambios notables en el riesgo de hipertensión. La presión sanguínea es substancialmente más alta en la ciudad de Ibadan que en áreas rurales próximas. Esto es así, a pesar de que las diferencias entre ambos grupos, en cuanto a obesidad e ingesta de sodio, son pequeñas. El estrés psicológico y la falta de actividad física ayudarían también a explicar el incremento.

El estrés psicológico y el social, difíciles de medir, divergen de una cultura a otra. Pocos objetarán, sin embargo, que los negros de Norteamé-



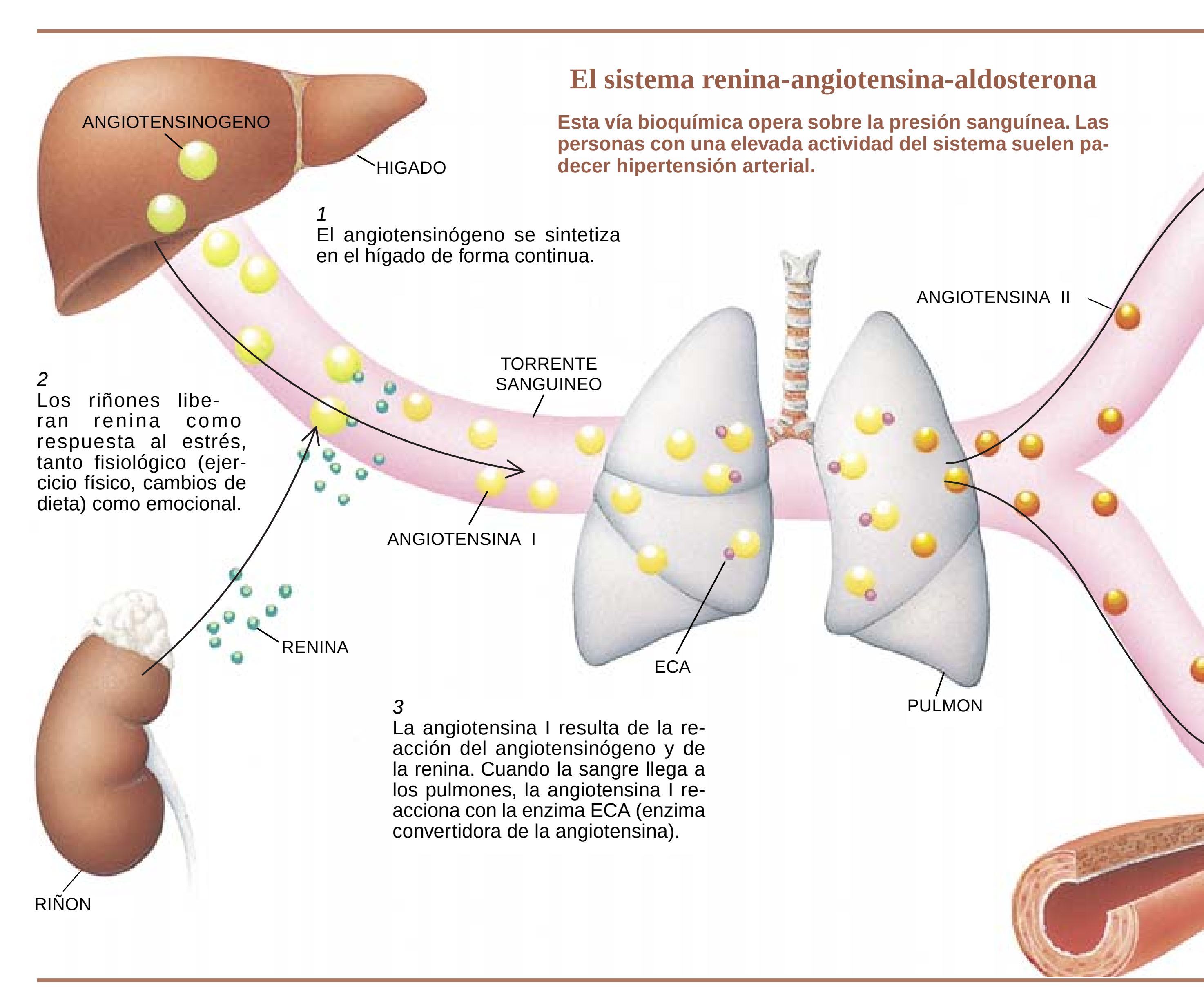
2. EL INDICE DE MASA CORPORAL es una medida de la razón de peso a altura. Se habla de sobrepeso en índices superiores a 25. En el estudio desarrollado por los autores entre descendientes de africanos, un índice medio bajo de una población se correspondía con una tasa baja de hipertensión. A medida que aumentaba el índice de masa corporal medio, crecía la prevalencia de la hipertensión. La obesidad contribuye al desarrollo de la hipertensión arterial.

rica y Europa se enfrentan a un tipo singular de estrés: la discriminación racial. Se desconocen los efectos a largo plazo del racismo sobre la presión sanguínea; sí se sabe que los negros de Trinidad, Cuba y zonas rurales de Puerto Rico muestran niveles de tensión arterial similares a los de otros grupos raciales. Tal vez, se podría conjeturar que las relaciones interraciales en estas sociedades sean menos agresivas para el sistema cardiovascular que en EE.UU.

En cuanto epidemiólogos, nos interesa ir más allá de la mera descripción de los agentes relacionados con el incremento de riesgo de hipertensión y analizar la interacción entre factores ambientales y biológicos que producen la enfermedad. No se conoce en su pormenor el mecanismo regulador de la presión sanguínea. Sí se sabe que el riñón desempeña un papel fundamental mediante el control de la concentración en la sangre de los iones de sodio (que provienen de la sal común —cloruro sódico— de la dieta), que a su vez incide en el volumen de sangre y su presión.

Los riñones evolucionaron en una situación en que la dieta humana era pobre en sodio, por lo que desarrollaron una enorme capacidad de retención de este ion vital. Cuando filtran la sangre, los riñones retienen hasta un 98 por ciento del sodio, que luego termina por volver a la circulación. Pero si reciben mucho sodio, lo secretan en grandes cantidades, con el incremento consiguiente de la presión arterial. Un exceso de sal en los riñones daña el mecanismo interno de filtración, lo que también redunda en un aumento mantenido de la presión.

Para saber si los riñones de nuestros pacientes regulaban bien la concentración de sodio, nos pusimos a medir la actividad de una importante vía bioquímica que interviene en la regulación de la presión sanguínea. El sistema renina-angiotensina-aldosterona (SRAA, nombre derivado de tres de los compuestos que participan) es una complicada cadena de reacciones químicas que regula la concentración sanguínea de la proteína angiotensina II. Cuenta ésta entre sus varias funciones la de inducir la constricción de la luz de los vasos sanguíneos. El aumento de la presión sanguínea que ello provoca, dispara la liberación de aldosterona, sustancia que incrementa la recuperación renal de sodio. En resumen, a una intensa actividad de la vía SRAA debería corresponder una presión sanguínea alta.



El sistema renina-angiotensina-aldosterona

Esta vía bioquímica opera sobre la presión sanguínea. Las personas con una elevada actividad del sistema suelen padecer hipertensión arterial.

Al objeto de establecer la actividad SRAA de los participantes, extrajimos muestras de sangre y determinamos la concentración en ellas de angiotensinógeno, una de las sustancias implicadas en el primer paso del SRAA. La elección de este compuesto se basa en su concentración en sangre, que, a diferencia de otros compuestos de la misma vía de vida media corta, se revela bastante constante.

De acuerdo con lo esperado, los niveles elevados de angiotensinógeno incrementaban la probabilidad de hipertensión. Esta asociación era más débil en las mujeres (las variaciones en los estrógenos también afectan a su presión sanguínea). Además, la concentración media de angiotensinógeno en cada grupo estudiado tendía a aumentar conforme nos trasladamos de Nigeria a Jamaica y de aquí a los Estados Unidos. Se observó idéntico patrón en el caso de la hipertensión, lo mismo en mujeres que en varones.



5
La aldosterona induce la retención de sal y agua por el riñón, lo que incrementa la presión sanguínea.

4
La angiotensina II es el producto de la reacción de angiotensina I y la ECA. La angiotensina II tiene dos efectos principales: induce la liberación de aldosterona por las glándulas suprarrenales y estimula la contracción del músculo liso vascular, lo que incrementa la presión sanguínea.

A tenor de nuestros resultados, algunos factores de riesgo de la hipertensión operan mediante la elevación de los niveles sanguíneos de angiotensinógeno. Ocurre, por ejemplo, con la obesidad. Una cantidad excesiva de grasa corporal conlleva aparejada una elevación en los niveles de angiotensinógeno. La incidencia de la obesidad aumentó de forma más o menos paralela a los niveles de hipertensión y de angiotensinógeno en nuestros grupos de estudio. Verdad es que correlación no es causalidad, pero los hallazgos apuntan a que la obesidad induce hipertensión, al menos en parte, mediante el incremento de la producción de angiotensinógeno.

Ciertos hallazgos del ámbito de la genética parecen respaldar el determinante papel que el incremento de angiotensinógeno desempeña en la aparición de la hipertensión. Hay personas portadoras de ciertos alelos de los genes que cifran la producción de angiotensinógeno. Estas variantes alélicas favorecen un incremento de su concentración y sus portadores acostumbran correr mayor riesgo de hipertensión.

Hace unos años, investigadores de la Universidad de Utah y del College de France informaron de la asociación mostrada entre dos alelos del gen del angiotensinógeno (235T y 174M) y niveles elevados de angiotensinógeno, en personas de ascendencia europea. Se ignora si estos alelos intervienen en el control de los niveles de angiotensinógeno o si se trata de simples marcadores que se heredan junto con otros alelos que sí dejan sentir su influencia.

Un gen asociado a una mayor proclividad a la hipertensión no tiene necesariamente que hallarse implicado en la patogenia de la enfermedad. Por tanto, los portadores del gen no deben forzosamente sufrir hipertensión. Se ha determinado que los factores genéticos explican del 25 al 40 por ciento de la variabilidad de la presión sanguínea. Se calcula que los genes relacionados con esta variabilidad pueden ser 10 o 15, lo que indica que cada gen contribuye únicamente con un dos o un cuatro por ciento de las diferencias de presión sanguínea entre distintas personas. Que un gen induzca hipertensión dependerá en medida notable de la presencia de influencias ambientales necesarias para instar la "expresión" real de semejante susceptibilidad.

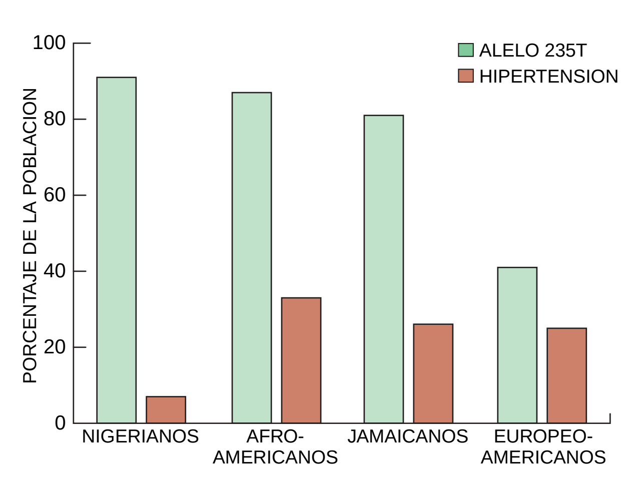
Los resultados de genética a los que hemos llegado nosotros ilustran lo que acabamos de afirmar. Hemos descubierto que el alelo 235T duplica, en afroamericanos, la frecuencia que acostumbra en euroamericanos. Sin embargo, los negros con esta variante del gen no parecen correr un riesgo mayor de hipertensión que los negros que no lo presentan. Entre los nigerianos encontramos una elevación moderada de los niveles de angiotensinógeno en los portadores de la variante del gen 235T; de nuevo, este factor no se tradujo en un mayor riesgo de hipertensión. Aún más, el 90 por ciento de los africanos que estudiamos portaban dicho alelo, mientras que la tasa de hipertensión en esa comunidad es, según lo comentado, bajísima. La frecuencia del alelo 147M resultó ser equivalente en ambos grupos.

Podría suceder que los niveles elevados de angiotensinógeno no bastaran para disparar la hipertensión en personas de ascendencia africana. Para inducir la enfermedad se requeriría la presencia de factores genéticos, fisiológicos o ambientales adicionales. Cabe también que el papel del alelo 235T en el desarrollo de la hipertensión no sea el mismo en todos los grupos étnicos.

Según nuestras investigaciones, un aspecto al menos de la nutrición puede modificar la fisiología de una persona y producir hipertensión. Pero hay que andar cautos a la hora de las generalizaciones fáciles. Para explicar la frecuencia de la hipertensión entre afroamericanos no basta un solo alelo o un único factor externo. De acuerdo con nuestro rastreo de la diáspora africana, un individuo con una dotación genética dada puede presentar cierta proclividad a la hipertensión, aunque ésta sólo se materializará en un entorno determinado. El reto estriba en acotar los factores genéticos y ambientales que afecten a la hipertensión, para luego juntar todas las piezas y establecer las múltiples maneras en que tales factores condicionan una elevación crónica de la presión sanguínea.

La hipertensión produce un siete por ciento de las muertes en todo el mundo, una proporción que aumentará conforme crezca el número de sociedades que adopten los hábitos y el estilo de vida de los países industrializados. Sin retorno posible al medio de donde salimos, compete a la ciencia

buscar soluciones. La revolución sanitaria llegó tras conocerse los mecanismos del contagio. Pudo tratarse la cardiopatía cuando quedó manifiesta la importancia de la dieta en el metabolismo del colesterol. La prevención y el tratamiento de la hipertensión también están sometidos al conocimiento sobre la forma en que los genes y el ambiente unen sus fuerzas para obstruir la regulación de la presión sanguínea.



3. LA PROPORCION de portadores del alelo 235T de cierto gen y la hipertensión en distintos grupos étnicos constituye un rompecabezas. Se creía que los portadores de 235T tendrían una alta incidencia de hipertensión, pero se ha observado que tal asociación no puede generalizarse. Así, la variante 235T es muy común entre los nigerianos, que apenas si conocen la hipertensión. No basta sólo un gen para controlar el desarrollo de hipertensión.

El desentrañamiento de los fenómenos implicados en el desarrollo de la hipertensión en los afroamericanos instará el replanteamiento de las divisiones étnicas y raciales de nuestra especie. El concepto de raza carece de fundamento biológico; a lo sumo se trata de un constructo social sin perfiles científicos. Hace tiempo que los antropólogos renunciaron a clasificar *Homo sapiens* en razas o subespecies. Pese a ello, la medicina y la epidemiología continúan asignando un sentido biológico a las clasificaciones raciales, argumentando que la raza es útil no sólo para distinguir entre grupos de personas, sino también para explicar la prevalencia de determinados trastornos. Sin embargo, las clasificaciones raciales que incorporan no se basan en criterios científicos, sino en categorías políticas o burocráticas como las que se usan en los censos.

No podemos olvidar el contexto social de la idea de raza. Vivimos en un mundo donde las designaciones raciales asumen un significado desafortunado. Los efectos destructivos del racismo complican cualquier estudio de enfermedades que, como la hipertensión, afectan a las minorías. A medida que exploremos las complejas interacciones entre los factores de riesgo externos (estrés y obesidad) y los genes asociados con la regulación de la presión sanguínea, los resultados deberán ser útiles para todos, al margen del color de su piel.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

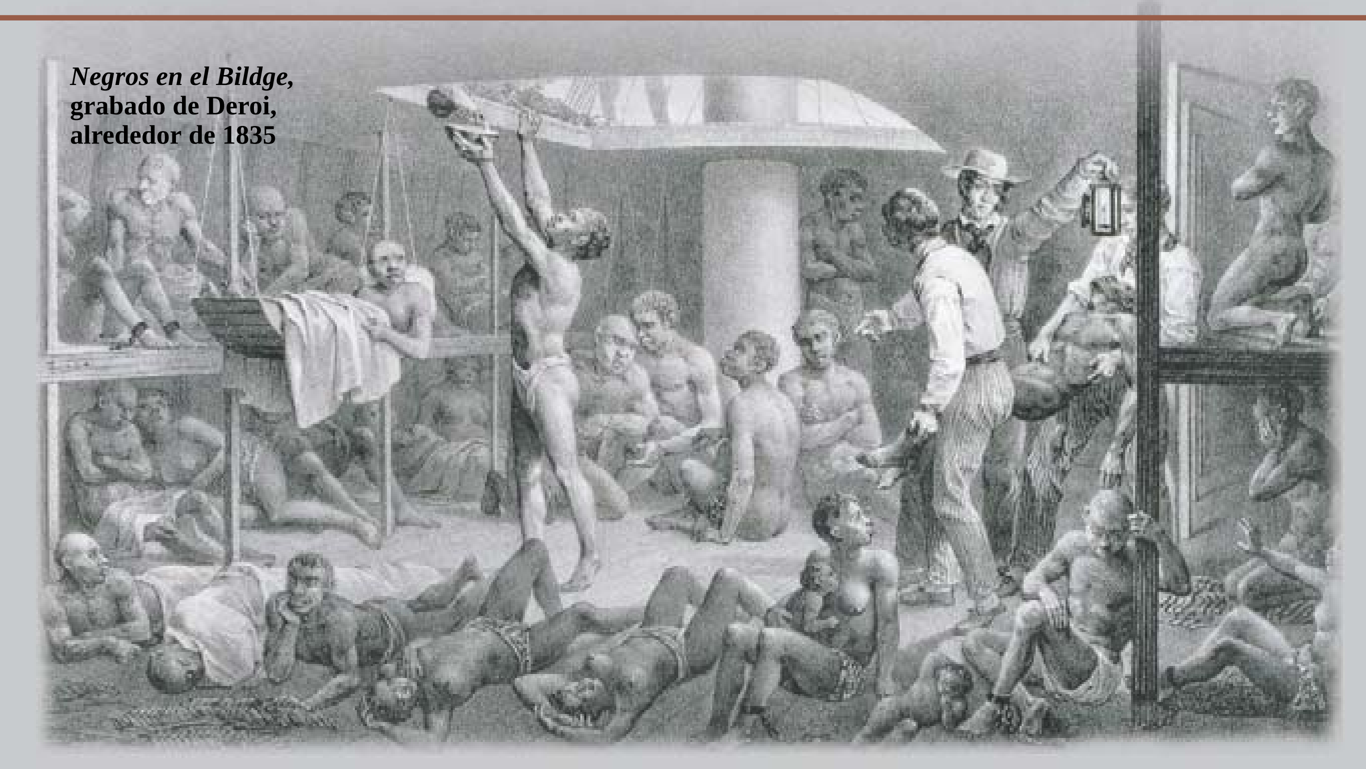
FAMILIAR AGGREGATION AND GENETIC EPIDEMIOLOGY OF BLOOD PRESSURE. Ryk Ward, en *Hypertension: Pathophysiology, Diagnosis and Management*. Dirigido por J. H. Laragh y B. M. Brenner. Raven Press, 1990.

MOLECULAR BASIS OF HUMAN HYPERTENSION: ROLE OF ANGIOTENSINOGEN. X. Jeunemaitre, F. Soubrier, Y. V. Kotelevtsev, R. P. Lifton, C. S. Williams, A. Charu *et al*, en *Cell*, vol. 71, n.º 1, páginas 169-180; octubre 1992.

THE SLAVERY HYPOTHESIS FOR HYPERTENSION AMONG AFRICAN AMERICANS: THE HISTORICAL EVIDENCE. Philip D. Curtin, en *American Journal of Public Health*, vol. 82, n.º 12, páginas 1681-1686; diciembre 1992.

HYPERTENSION IN POPULATIONS OF WEST-AFRICAN ORIGIN: IS THERE A GENETIC PREDISPOSITION? R. S. Cooper, C. N. Rotimi, en *Journal of Hypertension*, vol. 12, n.º 3, páginas 215-227; marzo 1994.

HYPERTENSION PREVALENCE IN SEVEN POPULATIONS OF AFRICAN ORIGIN. R. S. Cooper, C. N. Rotimi, S. L. Ataman, D. L. McGee, B. Osotimehin, S. Kadiri, W. Muna, S. Kingue, H. Fraser, T. Forrester, F. Bennet, R. Wilks, en *American Journal of Public Health*, vol. 87, n.º 2, páginas 160-168, febrero 1997.



Negros en el Bildge, grabado de Deroi, alrededor de 1835

Hipertensión y tráfico de esclavos

Una controvertida explicación que se aduce con frecuencia sobre la prevalencia de la hipertensión entre los estadounidenses negros, se basa en el viaje recorrido desde Africa a América por barcos de esclavos, el *pasaje medio*. Según dicha teoría, durante los viajes, los esclavos habrían experimentado una situación darwinista de "supervivencia del más adaptado", en la que la supervivencia dependería de la disponibilidad de los genes adecuados. Estos mismos genes serían los que hoy conferirían un incremento del riesgo de hipertensión.

A menudo se invocan teorías evolucionistas para explicar el motivo en cuya virtud cierto grupo racial o étnico muestra un riesgo mayor de desarrollar una enfermedad particular. El argumento suele atenerse al siguiente dictado: sobre la población actuó cierta presión de selección que favoreció la supervivencia de algunos miembros del grupo (y de sus genes) y eliminó otros. Si la población resultante no mezcló sus genes con otros grupos raciales o étnicos, algunas características genéticas podrían aparecer con una frecuencia creciente. Suponiendo que los afroamericanos tengan una predisposición genética a la hipertensión, los teóricos evolucionistas se preguntan cuál fue esa única y extrema presión de selección que ha hecho tan común un rasgo tan lesivo.

Algunos proponen que el viaje infrahumano en barcos de esclavos es un suceso de este tipo. Los esclavos padecían unos índices de mortalidad extraordinariamente elevados antes, durante y después de llegar a las plantaciones americanas. Muchas de estas muertes se debieron a lo que los médicos llaman enfermedades con pérdida de sal: diarrea, deshidratación y ciertas infecciones. La capacidad para retener sal podría haber tenido un valor capital para la supervivencia de los africanos arrastrados a América. En circunstancias modernas, la retención de sal predispondría a sus descendientes a la hipertensión.

Dada su aparente linealidad, se ha aceptado de forma acrítica la hipótesis de la esclavitud. La verdad, sin embargo, pudiera ser muy otra. Los estudiosos de la historia de Africa han cuestionado la veracidad de ese relato. No existen pruebas fehacientes de que las enfermedades con pérdida de sal fueran la primera causa de muerte en los barcos de esclavos. Los africanos morían a bordo por otras razones, entre ellas la tuberculosis (una infección que no se asocia a la pérdida de sal) y la violencia.

Si atendemos al fundamento biológico de la tesis, resulta harto endeble. La diarrea y otras enfermedades con pérdida de sal, en niños sobre todo, han sido las más letales en cualquier población durante toda la historia de la evolución humana. La presión de selección resultante de tales enfermedades debería esperarse que afectara a todos los grupos raciales y étnicos. Al menos en el Caribe y durante el siglo XVIII, los blancos tuvieron tasas de supervivencia apenas mejores que las de los esclavos, lo que indica de nuevo que cualquier presión de evolución no estaba limitada a los africanos. Por último, los datos actuales sugieren que los africanos que han emigrado a Europa en las últimas décadas también presentan una mayor presión arterial que los blancos, lo que apunta a efectos ambientales o algo común al bagaje genético africano general.

Desconocemos todavía los genes relacionados con la sensibilidad a la sal, que permitirían comprobar de forma directa la hipótesis del *pasaje medio*. Si éste hubiera funcionado como un cuello de botella evolutivo, debería haber reducido el tamaño de la población y la variabilidad genética, pues sólo habrían sobrevivido las personas con una dotación genética muy específica. Los datos disponibles abogan por una gran diversidad genética entre los afroamericanos, lejos de una presumida uniformidad.

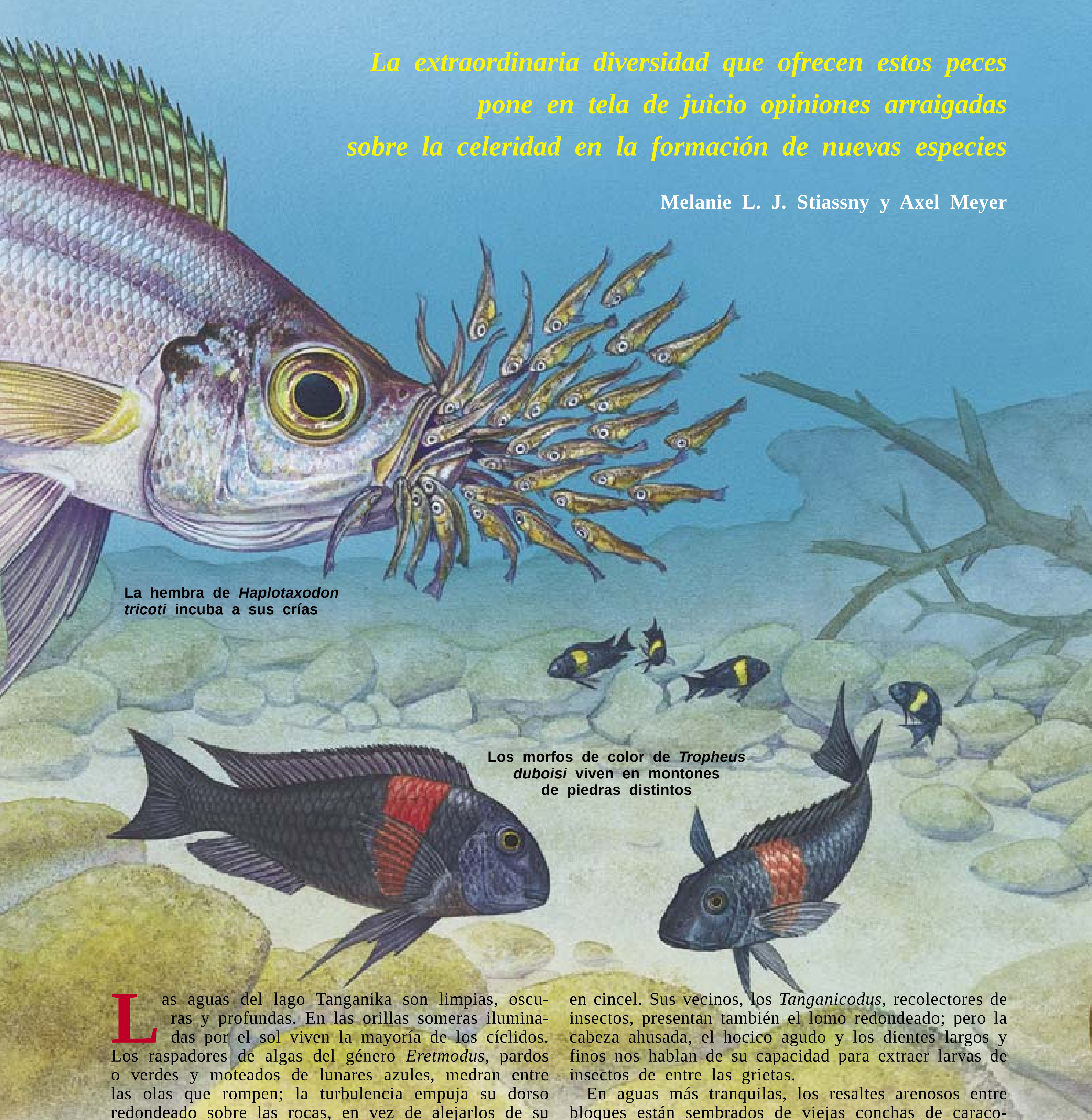
La hipótesis cómoda de la esclavitud para explicar la tasa de hipertensión refleja el atajo de las teorías genéticas y raciales. Su aceptación expresa la proclividad a atribuir razones genéticas de las diferencias entre blancos y no blancos sin evaluar las pruebas disponibles. Se trata de un sesgo tendencioso y anticientífico. La investigación genética es cada vez más objetiva y la capacidad de medir variaciones reales en las secuencias de ADN puede forzar a la sociedad a abandonar los prejuicios raciales y étnicos. O también revestirlos de nueva legitimidad. Lo que ocurra dependerá de cómo interpreten los científicos los hallazgos en un contexto que tenga en consideración las complejidades de la sociedad y la historia.

—R.S.C., C.N.R. y R.W.

Cíclidos de los lagos de Africa oriental

La extraordinaria diversidad que ofrecen estos peces pone en tela de juicio opiniones arraigadas sobre la celeridad en la formación de nuevas especies

Melanie L. J. Stiassny y Axel Meyer

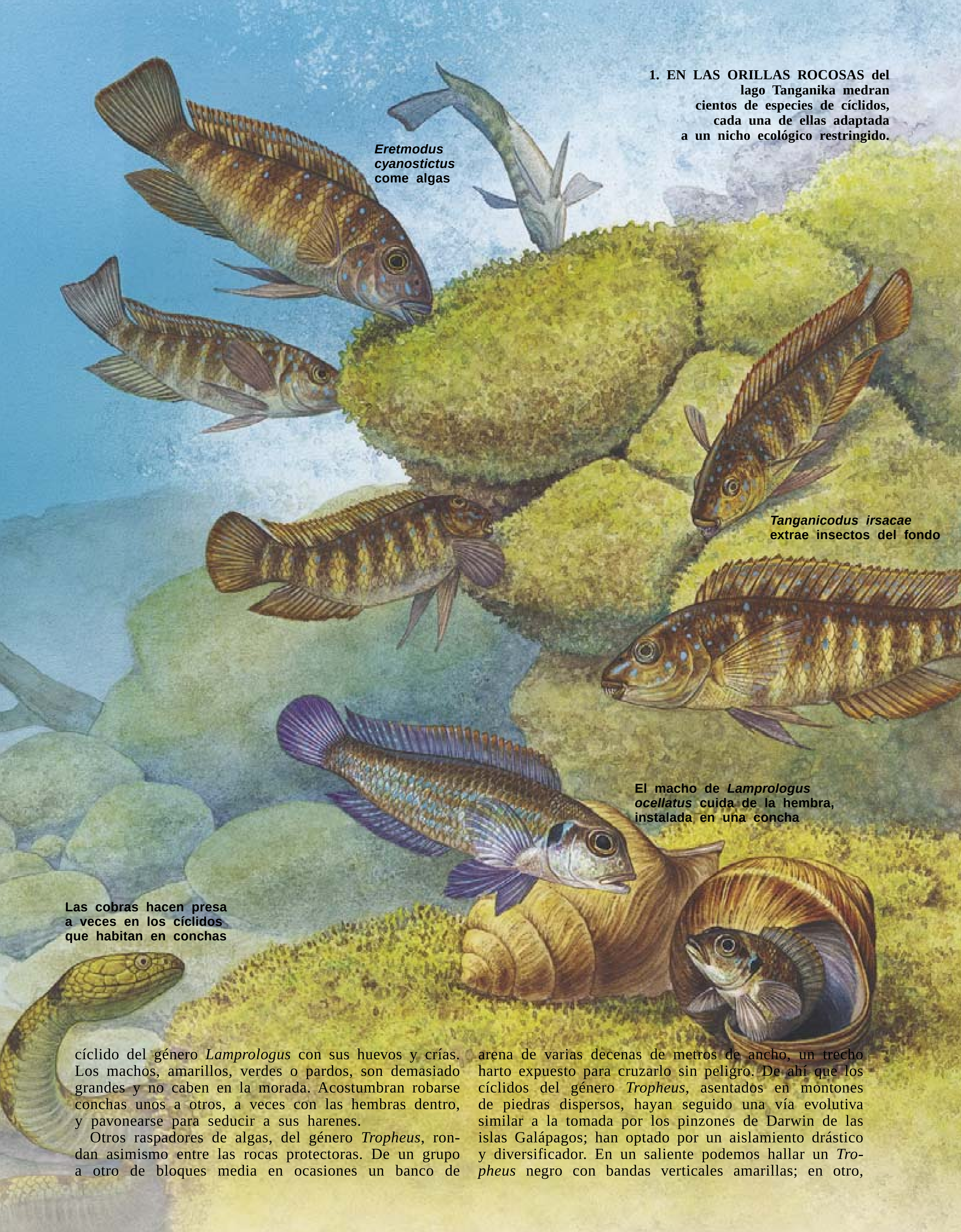


La hembra de *Haplotaxodon tricoti* incuba a sus crías

Los morfos de color de *Tropheus duboisi* viven en montones de piedras distintos

Las aguas del lago Tanganika son limpias, oscuras y profundas. En las orillas someras iluminadas por el sol viven la mayoría de los cíclidos. Los raspadores de algas del género *Eretmodus*, pardos o verdes y moteados de lunares azules, medran entre las olas que rompen; la turbulencia empuja su dorso redondeado sobre las rocas, en vez de alejarlos de su superficie. Mordisquean algas de las rocas con sus dientes en cincel. Sus vecinos, los *Tanganicodus*, recolectores de insectos, presentan también el lomo redondeado; pero la cabeza ahusada, el hocico agudo y los dientes largos y finos nos hablan de su capacidad para extraer larvas de insectos de entre las grietas.

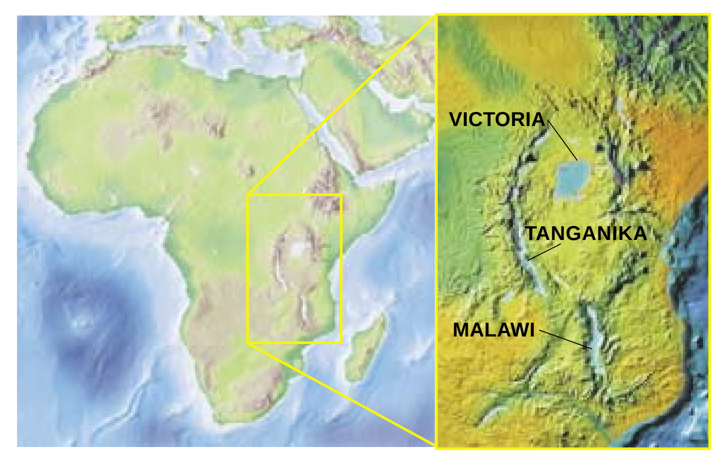
En aguas más tranquilas, los resaltes arenosos entre bloques están sembrados de viejas conchas de caracoles, en cuyo interior vive la hembra, minúscula, de un



1. EN LAS ORILLAS ROCOSAS del lago Tanganika medran cientos de especies de cíclidos, cada una de ellas adaptada a un nicho ecológico restringido.

cíclido del género *Lamprologus* con sus huevos y crías. Los machos, amarillos, verdes o pardos, son demasiado grandes y no caben en la morada. Acostumbran robarse conchas unos a otros, a veces con las hembras dentro, y pavonearse para seducir a sus harenes.

Otros raspadores de algas, del género *Tropheus*, rondan asimismo entre las rocas protectoras. De un grupo a otro de bloques media en ocasiones un banco de arena de varias decenas de metros de ancho, un trecho harto expuesto para cruzarlo sin peligro. De ahí que los cíclidos del género *Tropheus*, asentados en montones de piedras dispersos, hayan seguido una vía evolutiva similar a la tomada por los pinzones de Darwin de las islas Galápagos; han optado por un aislamiento drástico y diversificador. En un saliente podemos hallar un *Tropheus* negro con bandas verticales amarillas; en otro,

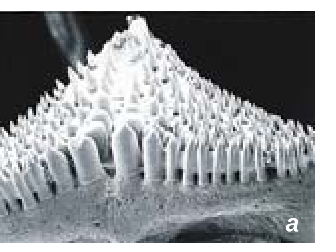


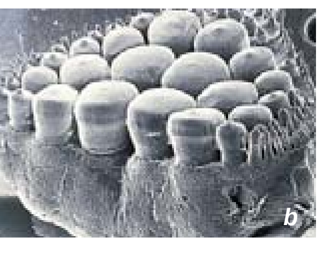
2. LOS LAGOS DE AFRICA ORIENTAL, Tanganika, Malawi y Victoria, contienen la mayor diversidad de especies de cíclidos. Pero la familia se extiende por las aguas cálidas de la mayor parte del globo.

un pez idéntico aunque con bandas blancas y azules. Hasta un centenar casi de estos "morfos de color" se han descubierto.

Tamaña diversidad ha convertido a la familia Cíclidos en el ejemplo arquetípico de manual. Los cíclidos, peces de agua dulce con aletas de radios espinosos, aparecen en multitud de colores, formas y hábitos. Medran en los ríos y lagos cálidos de Africa, Madagascar, India meridional, Sri Lanka y América central y del sur, que en su mayoría formaban parte del antiguo continente austral de Gondwana, disgregado hace 180 millones de años. (Sólo una especie, el cíclido de Texas, se ha adentrado en Norteamérica.) La observación sugiere un linaje antiguo para la familia, si bien el registro fósil permanece silencioso más allá de los últimos 30 millones de años.

Gracias a la investigación de Stiassny, coautora del artículo, se conocen 15 especies de cíclidos en Madagascar, a los que hay que sumar otras tres en la India meridional. Representarían las estirpes más antiguas. Muchas de estas especies antiguas sobreviven en Madagascar, donde no pudieron llegar sus competidoras que evolucionaron en el continente africano. La India permaneció también aislada durante millones de años. En aguas americanas hay unas 300 especies. Con mucho, la mayor diversidad de cíclidos se encuentra, sin embargo, en Africa oriental, en los grandes lagos Victoria, Malawi y Tanganika.







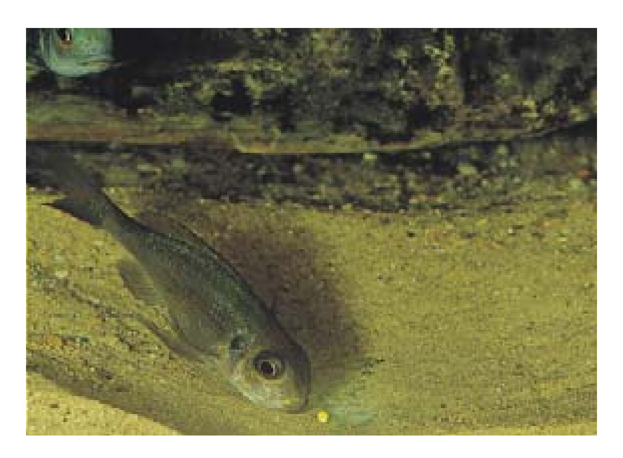
3. ANATOMIA DE LOS CICLIDOS y su asombrosa capacidad de adaptación. Los dientes de *Cichlasoma citrinellum* pueden adoptar la forma de agudos punzones (*a*) o de trituradores planos (*b*). La radiografía (*c*) muestra los dos juegos mandibulares de un cíclido.

La geología indica que el lago Victoria, en figura de plato y con la extensión de Irlanda, se formó hace entre 250.000 y 750.000 años. Alberga más de 400 especies de cíclidos. Los lagos Malawi y Tanganika son estrechos y profundos; llenan el rift entre la placa tectónica de Africa oriental y la de Africa central. Con unos cuatro millones de años de antigüedad, el lago Malawi aloja de 300 a 500 especies de cíclidos. Dos centenares viven en el Tanganika, cuya edad se cifra entre nueve y doce millones de años. No obstante la dilatada historia familiar de los Cíclidos y de los lagos que habitan, la variedad que los caracteriza surgió en los últimos millones de años.

Se atribuye a varios factores tal diversidad. De entrada, la anatomía. Los Cíclidos poseen dos juegos de mandíbulas: uno en la boca, con el que succionan, raspan o mordisquean fragmentos de comida; otro en la garganta, para triturar, macerar, cortar o perforar el bocado antes de ingerirlo. Son los únicos peces de agua dulce que poseen un segundo juego mandibular modificado; a grandes rasgos, se trata de arcos branquiales (series de huesos que sostienen las branquias) remodelados. Ambos juegos de mandíbulas manifiestan una notable plasticidad y adaptación. Meyer, el otro firmante, ha demostrado que pueden cambiar de forma incluso durante la vida del animal. (Hasta los dientes se transforman de punzones agudos y afilados en trituradores planos, semejantes a molares.) Los peces forzados a comer un tipo de dieta pueden terminar con un aspecto muy distinto.

Los dos juegos de mandíbulas, ajustados a los hábitos alimentarios, permiten que cada especie ocupe su exclusivo nicho ecológico y así que coexistan cientos de ellas sin entrar en competencia directa. De haber pretendido explotar los mismos recursos, la mayoría se hubiera visto condenada a la extinción.

En los comedores de escamas hallamos ejemplificada la razón de semejante especialización alimentaria. Viven en los tres grandes lagos. Se acercan a otros cíclidos por detrás y arrancan un bocado de escamas del costado. En el lago Tanganika hay siete especies, pertenecientes al



4. FECUNDACION de los huevos de *Ophthalmotilapia ventralis*. Adviértase su insólita rutina. La hembra pone un huevo y lo toma en la boca para dejarlo a buen recaudo (*izquierda*); a continuación el macho libera su esperma en el mismo lugar. Manchas

género *Perissodus*. Michio Hori descubrió dos tipos de comedores de escamas dentro de la misma especie *P. microlepis,* los que presentan la cabeza y las mandíbulas curvadas hacia la derecha y los que lo hacen a la izquierda. Los peces no sólo comen exclusivamente escamas, sino que, además, se han especializado en arrancar las escamas de un mismo lado. Los zurdos atacan el flanco derecho de sus víctimas; los diestros, el costado izquierdo. Podemos atribuirle un origen evolutivo a esta asimetría morfológica, en el seno de una misma especie inclusive; en efecto, una cabeza ladeada facilita la operación de arrancar las escamas. Una vez introducidas en la boca, el segundo juego mandibular apila las escamas una sobre otra, antes de ingerirlas como paquetes de proteína.

(Las víctimas sobreviven, pero se vuelven más precavidas con los atacantes de ambos flancos. Ahora bien, si la población de comedores zurdos aumentara y superase el número de los diestros, los afectados se harían más cautelosos ante posibles ataques de la derecha. Se les ofrecería una ventaja a los comedores de escamas diestros, con el aumento consiguiente de su población. La interacción entre tales fuerzas garantiza que la demografía relativa de diestros y siniestros permanezca en equilibrio.)

Para explotar medios muy dispares cuentan los cíclidos con una estrategia reproductora singular. Es éste otro factor de diversificación. Del resto de los peces se separan los cíclidos por el tiempo y la energía que invierten en la progenie. Siguen cuidando de la puesta mucho después de la eclosión; la asociación entreverada entre padres e hijos fomenta un sistema complejo de comunicación. Si de los huevos fecundados puede ocuparse un solo progenitor, en cuanto la puesta adquiere movilidad se requiere la asistencia de los dos. Y entonces entra en juego un muestrario fascinante de sistemas sociales: monogamia, poliandria e incluso poliginia.

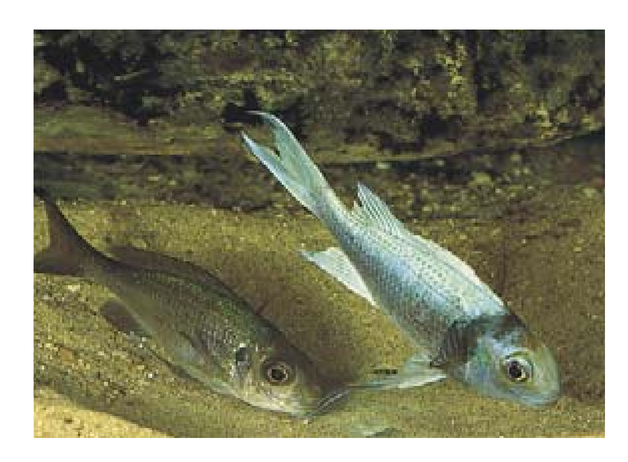
Muchos cíclidos mantienen los huevos fecundados o las crías en la boca. Con esa estrategia compartida proporcionan refugio seguro a las crías amenazadas y, con el ramoneo de algas o la ingestión de otro tipo de comida, las alimentan en el interior de la boca. Abundan las especies que, a la manera del cuco, colocan subrepticiamente sus huevos fecundados o sus juveniles entre las puestas de otros cíclidos, para librarse del esfuerzo de la crianza.

Los incubadores bucales ponen menos huevos que otros, a veces no más de 10; invierten, pues, mucho tiempo y energía por hijo. Además, la población total de una especie que incuba con la boca suele ser reducida, hasta el punto de que bien pueden constituir una especie los escasos cientos de individuos que viven en un saliente rocoso. Pero las mutaciones que llevan a la formación de una especie distinta se propagan antes en una comunidad pequeña que a través de una población extensa. El tamaño restringido de las poblaciones de los incubadores bucales pudo haber contribuido a la diversificación específica de los cíclidos.

En los lagos de Africa oriental, los machos de los incubadores bucales no cuidan de la progenie. Pugnan, sin embargo, por fecundar el mayor número de huevos. A veces forman congregaciones en lek, en cuyo marco se mueven rápidamente y se pavonean para atraer a las hembras. Un lek puede consistir en 20 a 50 machos, aunque en algunas especies se han observado más de 50.000. También, los machos (así en *Ophthalmotilapia*, con sus vistosos colores de pavo real) construyen pérgolas complejas sobre las que se exhiben ante las hembras. Para levantar la pérgola, unos individuos que pesan alrededor de 300 gramos llegan a remover más de 750 gramos de arena y grava. Cuando seducen a la hembra para que realice la puesta en su pérgola (la mayor suele ser la elegida), el macho fecunda en seguida los huevos. La



5. LA INCUBACION BUCAL es una estrategia mediante la cual muchos cíclidos aseguran la supervivencia de sus crías. Esta hembra de *Nimbochromis livingstonii* del Malawi recupera a sus crías cuando algún peligro amenaza.



amarillas en la punta de sus aletas ventrales imitan el huevo, y la hembra intenta recolectar también este falso huevo (*derecha*). En el proceso, absorbe los espermatozoides, de modo que el huevo es fecundado en la boca.

hembra se los lleva a la boca y se va nadando, en busca de otro macho.

Las hembras de los cíclidos suelen ser de un color gris o pardo apagado; los machos, de colores brillantes. Los diversos tonos —recuérdense los morfos de color citados— responderían, probablemente, a la presión de selección sexual. Habría ésta promovido la divergencia específica con mayor peso que lo haya hecho la supervivencia física. Los colores distintos de peces que, en todo lo demás, son idénticos pueden servir de barrera interespecífica: una hembra de *Tropheus*, que prefiere machos amarillos, no se apareará con otro de color rojo.

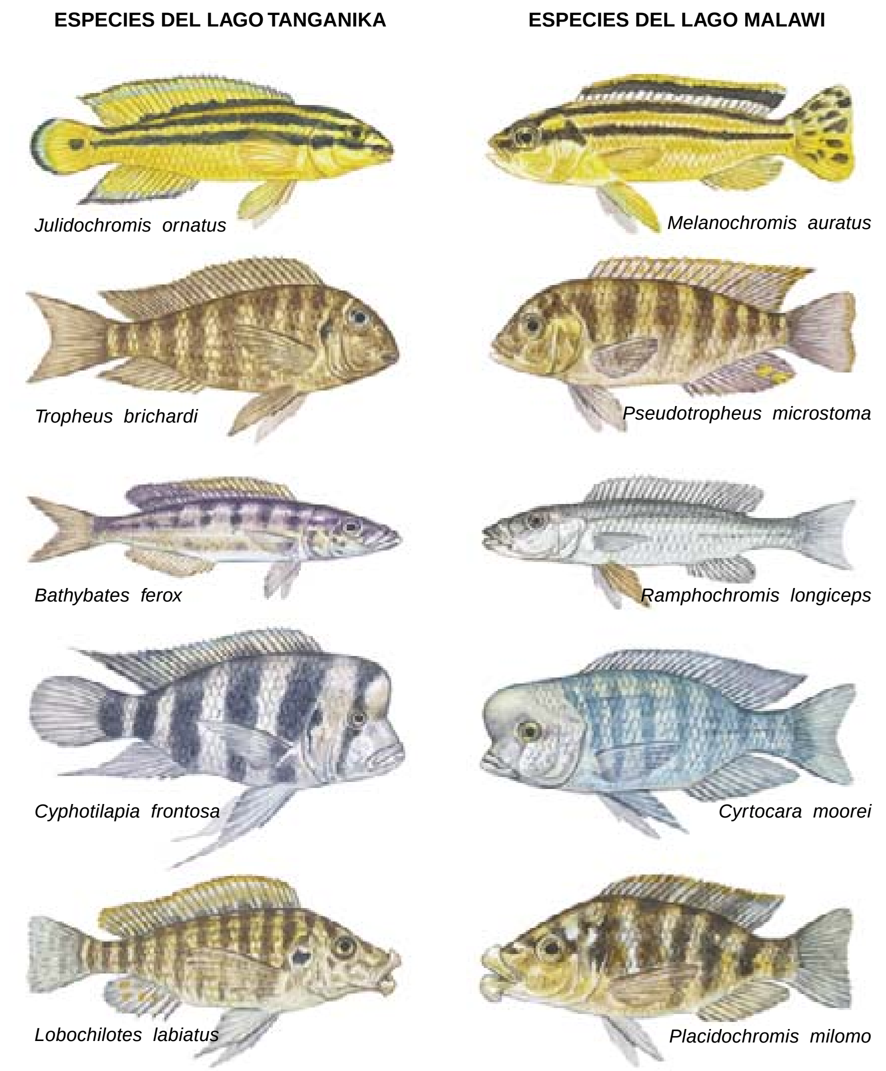
Hasta hace muy poco se desconocían las precisas relaciones de parentesco entre estos centenares de especies. Las respuestas comienzas a llegar gracias a las técnicas moleculares, que también plantean cuestiones nuevas. Aunque la investigación genética confirma hipótesis basadas en la anatomía, no es infrecuente que contradiga ideas arraigadas.

Según sugiriera Mutsumi Nishida, fueron estirpes precoces de cíclidos de Africa oriental las que colonizaron el Tanganika. Los cíclidos de este lago antiguo, con peculiaridades genéticas exclusivas, corresponden a 11 linajes (derivan de 11 especies ancestrales). Mucho más tarde, algunos abandonaron los límites del lago e invadieron los sistemas fluviales de Africa oriental que les transportaron hasta los lagos Victoria y Malawi. Investigando las secuencias de ADN mitocondrial, el equipo de Meyer ha puesto de relieve la proximidad genética entre los cíclidos del lago Victoria; esa cercanía mutua es mucho mayor que la que guardan con los cíclidos, morfológicamente similares, de los otros dos lagos. Derivan casi por entero de un mismo linaje de incubadores bucales.

Nos indica ese panorama que las adaptaciones evolutivas casi idénticas evolucionan muchas veces con independencia unas de otras. En los tres lagos hay cíclidos con su propia anatomía distintiva, que les capacita para alimentarse de otros peces o de huevos y larvas, para mordisquear aletas, raspar algas, arrancar escamas, triturar moluscos y otras mil funciones más. Se trata de adaptaciones tan singulares, improbables por ende de repetirse en el curso evolutivo, que, en buena lógica, diríase que las especies dotadas de parejas calificaciones deben estar estrechamente emparentadas.

En coherencia con ese razonamiento, la predilección raspadora tendría que haber aparecido por evolución una sola vez; quienes se alimentan así de algas deberían haberse dispersado más tarde. Pero los raspadores de algas de los lagos Victoria y Malawi han evolucionado de manera independiente de los del lago Tanganika, a partir de un antepasado con tendencias más generalistas. De acuerdo con la investigación genética, la evolución descubre la misma solución, una y otra vez, a los mismos retos ecológicos.

Los propios rasgos morfológicos pueden cambiar a un ritmo dispar y desacompasado de las modificaciones genéticas. Algunas especies del lago Tanganika apenas han alterado su aspecto físico a lo largo del tiempo: numerosos cíclidos fósiles, tilapias en particular, guardan un estrecho parecido con sus descendientes modernos del lago. Salvo en el color, las especies de *Tropheus* permanecieron, morfológicamente hablando, casi inmutables. Por contra, los cíclidos del Victoria, de tamaño, forma y colorido dispares, evolucionaron en un intervalo temporal muy corto. Hay entre las más de 400 especies del lago menos variación genética que en el seno de *Homo sapiens*. De acuerdo con el reloj molecular fundado en la velocidad de mutaciones registradas en



6. CICLIDOS LEJANAMENTE EMPARENTADOS de los lagos Tanganika y Malawi han evolucionado hasta convertirse en misteriosamente parecidos por el hecho de ocupar nichos ecológicos similares. Demuestran que la semejanza morfológica puede guardar escasa correlación con el parentesco genético o el linaje evolutivo (relación filogenética). Todos los cíclidos del lago Malawi están más estrechamente emparentados entre sí que con cualquiera de los cíclidos del lago Tanganika.

MELANIE L. J. STIASSNY y AXEL MEYER estudian distintos aspectos de los cíclidos, un grupo emblemático en biología evolutiva. Stiassny, doctorada en 1980 por la Universidad de Londres, trabaja en el departamento de ictiología del Museo Americano de Historia Natural, dedicada a la biología de la conservación de los cíclidos. Meyer, formado en Berkeley, enseña zoología en la Universidad alemana de Konstanz. Ha sido uno de los introductores de la aplicación de las técnicas de ADN en el estudio de los procesos evolutivos.

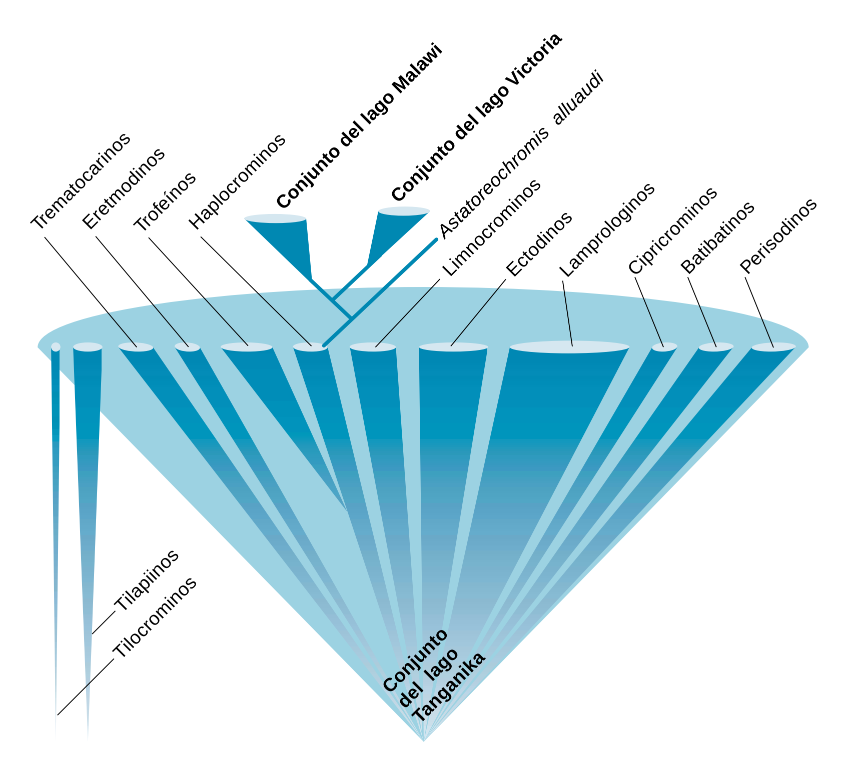
el ADN mitocondrial, las varillas del abanico de especies del Victoria se forjaron en los últimos 200.000 años.

La investigación paleoclimática acometida por el equipo de Thomas C. Johnson acota los límites del origen del grupo de cíclidos del lago Victoria. Según parece, el lago se secó casi por completo hace menos de 14.000 años. Sólo una cifra de individuos —no digamos de especies— restringida pudo sobrevivir. De ser ello cierto, la velocidad de especiación mostrada por los cíclidos resultaría espectacular, sin parangón en ningún otro vertebrado. Además, la laguna Nabugabo, separada del Victoria por una barra arenosa hace menos de 4000 años, alberga cinco especies de cíclidos endémicas. Se les asignan parientes cercanos del Victoria, aunque difieren sobre todo por la coloración de reproducción de los machos. Y, lo que todavía es más notable: el extremo meridional del lago Malawi, reseco hace sólo dos siglos, está ahora habitado por numerosas especies y morfos de color que no se encuentran en ningún otro lugar.

Estos ejemplos, respaldados por datos recientes de ADN para el lago Tanganika, inducen a ver en el aislamiento repetido el mecanismo de especiación de los cíclidos. Los descensos sucesivos de nivel del Tanganika, hasta 600 metros, habrían facilitado la formación de los morfos de color de *Tropheus* y cuantos viven entre rocas. Poblaciones que solían intercambiar genes quedaron aisladas en pequeños remansos de agua; siguieron una vía propia de evolución hasta que tornaron a encontrarse cuando subieron las aguas, demasiado tarde para poder cruzarse.

Si la tasa de especiación del lago Victoria ha superado hitos, no menos célere ha resultado la tasa de extinción. Hace medio siglo, los cíclidos constituían el 99 por ciento de la biomasa piscícola del lago; hoy no alcanzan el 1 por ciento. Muchas especies se han extinguido; otras conforman poblaciones tan mermadas, que las probabilidades de recuperación son mínimas. Las causas de semejante quebranto son coincidentes: destrucción del medio, introducción de especies externas, contaminación, crecimiento demográfico y sobreexplotación.

El "clavo que ha remachado el ataúd del Victoria" ha sido un voraz depredador, la gigantesca perca del Nilo. Introducida en el lago en los años cincuenta para aumentar el rendimiento pesquero, treinta años más tarde la población de percas



7. EL ARBOL FILOGENETICO demuestra que los cíclidos de los lagos Malawi y Victoria descienden probablemente de un único linaje de incubadores bucales (Haplocrominos) que se escaparon del lago Tanganika. Los cíclidos de este último lago, más antiguo, exhiben el mayor grado de diversidad genética. Las secciones de los conos indican aproximadamente el número de especies de cada tribu.

se había disparado y caído la de cíclidos en un factor de 10.000. En buena parte, el lago se ha vuelto anóxico. Muchos cíclidos devorados por las percas eran comedores de algas: al desaparecer éstos, las algas muertas se pudren y consumen el oxígeno del agua. Cuando caen en las redes de los pescadores locales, las percas del Nilo, de casi dos metros de longitud, no pueden secarse al sol, sino que han de ahumarse, para lo que se usa leña de los bosques limítrofes. Por culpa de la deforestación el suelo erosionado por las lluvias corre hacia el lago, con el aumento consiguiente de la turbidez y anoxia.

Nos encontramos con una imagen que ya resulta demasiado familiar. Una comunidad antaño henchida de vida apenas mantiene los andrajos de su variopinta diversidad. El extraordinario teatro evolutivo en el que actúan los cíclidos del lago Victoria está bajando el telón con mayor brusquedad con que lo levantó.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FREQUENCY-DEPENDENT NATURAL SELECTION IN THE HANDEDNESS OF SCALE-EATING CICHLID FISH. Michio Hori en *Science*, vol. 260, págs. 216-219; 9 de abril, 1993.

PHYLOGENETIC RELATIONSHIPS AND EVOLUTIONARY PROCESSES IN EAST AFRICAN CICHLID FISHES. A. Meyer en *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 8, n.º 8, págs. 279-284; agosto 1993.

AN OVERVIEW OF FRESHWATER BIODIVERSITY: WITH SOME LESSONS FROM AFRICAN FISHES. Melanie L. J. Stiassny en *Fisheries*, vol. 21, n.º 9, págs. 7-13; septiembre 1996.

PERFILES

Steve Mirsky

DENNIS STANFORD: Crujir de huesos

Estrecha con energía su mano potente, de la que cuentan que desatornilla, sola, los pernos de las ruedas del coche. La verdad es que no me sorprende. Sí resulta curioso que este hombre de complexión robusta y cierto desaliño indumentario escogiera la carrera académica en vez de dedicarse al pugilato. Dennis Stanford dirige el departamento de antropología del Museo Nacional de Historia Natural de la Institución Smithsoniana.

Lo vemos también al frente del programa Paleoindios/Paleoecología del museo, un proyecto interdisciplinar para conocer la historia de los primeros pobladores del Nuevo Mundo. Su mano está curtida para esa labor de arqueología experimental y de campo, cuando ha de recrear los instrumentos de piedra y hueso de los paleoamericanos y trabajar con ellos.

Su carácter retraído y amante de la soledad le viene de lejos. "Mi escuela estaba como a unos cinco kilómetros campo a través", rememora de su infancia en Albuquerque. "Por el camino recogía los restos de objetos más o menos trabajados y fosilizados. Me parecían fantásticos." En eso siguió, ampliado y corregido, cuando su familia se trasladó a Wyoming. Le gustaba departir con vagabundos y subirse con ellos en los trenes de mercancías. Stanford es uno de los pocos que ha publicado en las revistas científicas más prestigiosas y ha pasado una noche en comisaría por marginal.

En su vocación hay un momento decisivo. Cursando bachillerato aparecieron unos huesos extraños en unas obras de remoción. Le pidieron opinión. "Toda la gente sabía que yo, el chaval extravagante de los Stanford, entendía de esas cosas. Y sentencié: '¡Vaya, vaya!, son huesos de mamut'." Llegaron, para mayor seguridad, los expertos. Acabó trabajando y confraternizando con ellos. "No les di la oportunidad de que me dijeran que no", confiesa. "Estaba allí, y no iba a marcharme."



1. Dennis Stanford, hábil descubridor y recreador de técnicas paleolíticas

Tampoco aceptó que le denegaran la admisión en la Universidad de Wyoming. Era ésta un centro modesto, sin plantilla para impartir una carrera completa de arqueología. Y el único arqueólogo del claustro, Bill Malloy, no aceptaba la tutoría de ningún alumno. "Me dijo: 'No hay trabajo, no hay futuro'. Y yo le repuse: 'Bueno, yo voy a quedarme aquí, y voy a ser su alumno. Para eso le pagan, así que manos a la obra, hombre'."

Malloy le obligó a enfrascarse en la bibliografía arqueológica y antropológica. Gracias a su dirección, en el siguiente paso —doctorando en la Universidad de Nuevo México— "me encontré que estaba mucho mejor preparado que ninguno de mis colegas. Las perspectivas de empleo resultaron ser mejores de lo que Malloy había pronosticado. Stanford recibió una oferta de la Institución Smithsoniana antes de que hubiera acabado su doctorado. Allí permanece desde 1972.

Su principal interés, compartido con su mujer, Margaret Jodry, que también trabaja en la Smithsoniana, se centra en saber cuándo llegaron los primeros pobladores a América del Norte y en averiguar quiénes eran. A principios de los setenta, la doctrina admitida exponía que los primeros americanos, procedentes del noreste asiático, habían cruzado el estrecho de Bering camino de Alaska, hace unos 11.000 años. Se les llamó el pueblo clovis, denominación que les viene del lugar de Nuevo México donde los arqueólogos descubrieron un tesoro de herramientas de hueso y piedra. Estos recién llegados, seguía la tesis oficial, poblaron el

continente, desperdigándose por todas partes —de una a otra costa, desde Canadá hasta el centro de México— en sólo un siglo. Así lo corroboraban otros hallazgos de herramientas fabricadas de manera similar y en dataciones de radiocarbono.

Stanford y otros advenedizos comenzaron a poner en tela de juicio la tesis recibida. La ausencia de cualquier forma ancestral de los artefactos tipo clovis le preocupaba. "La técnica [clovis] difería radicalmente de cuanto conocíamos de Siberia o incluso de Alaska." Hasta que las investigaciones dirigidas por Tom D. Dillehay, de la Universidad de Kentucky, pusieron de manifiesto la presencia de hombres en el continente americano al menos un milenio antes que los clovis. El trabajo de campo se realizó en un lugar cercano a Monte Verde, en Chile, y sobre él Dillehay acaba de publicar un abultado segundo volumen. Stanford tuvo algo que ver, una pequeña tarea se excusa, revisando los datos. Monte Verde ha adelantado más la fecha de los poblamientos preclovianos en América, que consistieron, se afirma ahora, en una compleja serie de migraciones con origen en Asia.

Stanford y Bruce A. Bradley, experto máximo en útiles líticos, se hallan analizando objetos del paleolítico superior procedentes de España. ¿Por qué? Las puntas clovianas suelen ser bifaces, esto es, con el filo tallado por ambas caras. La mayoría de los objetos europeos sólo han sido trabajados por una cara. Sin embargo, algunas puntas de Francia y de la península Ibérica se parecen más a las de los clovis que otros instrumentos encontrados en sus propios aledaños. Stanford especula sobre la posibilidad de que algunos paleoamericanos procedieran en realidad de lo que actualmente es Europa y que lograran llegar hasta Maine navegando de isla en isla.

Al reconstruir las condiciones que se dieron hace 20 milenios, los geólogos sostienen que el clima y las corrientes facilitarían tales migraciones. "La gente llegaba a Australia hace 50.000 años, y para eso hay que cruzar algunos trechos bastante grandes del océano Pacífico", musita. A lo mejor algunos trechos del Atlántico también fueron atravesados antes de Erik el Rojo o de Colón. El ansia por ampliar un panorama cerrado no significa, sin embargo, que Stanford acepte cualquier teoría que se le presente. "Es muy pragmático", dice Anna K. Behrenseyer, investigadora de la Smithsoniana, experta en tafonomía o estudio de la fosilización de los organismos. "Simplemente está buscando todas las pruebas."

Un caso paradigmático es el de los huesos escamados de 1978. En algunos yacimientos de Canadá, los investigadores habían descubierto restos de caza del mamut. Pero allí donde esperaban encontrar herramientas de piedra, sólo pudieron desenterrar huesos que parecían tener tallado un filo. En vez de aceptar sin más la teoría de los utensilios de hueso, Stanford y un equipo de carniceros adiestrados se pusieron manos a la obra, nunca mejor dicho, con los huesos de un elefante que había muerto en el Zoo Franklin Park, de Boston. Comprobaron que los huesos de un mamífero de gran tamaño podían efectivamente ser elaborados, como las piedras, para crear instrumentos útiles. (Y otro descubrimiento: los tendones de elefante, si se mastican para ablandarlos, se encogen al secarse; si se atan con ellos la hoja y el mango, la herramienta queda prieta.) Pero, ¿por qué usar huesos si la piedra es mejor? Stanford se embute en la piel del hombre del Pleistoceno: "Puede que el primero en llegar no supiera dónde encontrar las distintas piedras." Se reservaría los mejores utensilios de su ajuar, evitando su desgaste y deterioro.



2. Reproducciones de artefactos de los primeros americanos, entre los que se encuentran una punta de proyectil tallada en la punta de un palo (a), *un atlatl (lanzador de venablos,* (b), *bifaces incompletas* (c, d) *y réplicas de puntas desenterradas en diferentes yacimientos: Clovis* (e, g), *Hell Gap* (f, i) *y Folsom* (h)

Más duro es el asunto del "Hombre de Kennewick". El 28 de julio de 1996, se desenterró un esqueleto humano en Kennewick (estado de Washington), que tenía unos 9000 años y que poseía características distintas de las propias de indios modernos. Una interpretación estricta de la Ley de Repatriación y Protección de las Tumbas de Nativos Americanos parecía conceder a las tribus indias locales la custodia de los restos. Algunas tribus estaban empeñadas en enterrar el esqueleto y sustraérselo a los antropólogos. Pero los científicos replicaron que los restos requerían un estudio más profundo para determinar si correspondían o no a un hombre vinculado a los indios actuales. Era como la pescadilla que se muerde la cola: la única manera de saber si los huesos debían ser estudiados era estudiar los huesos.

El 16 de octubre de 1996, Stanford y otros siete expertos pusieron pleito para poder acceder al Hombre de Kennewick. Tras casi dos años de procedimientos legales, un magistrado norteamericano ordenó que los huesos fueran trasladados al Museo Burke de la Universidad de Washington, donde los científicos del Departamento de Interior tomarán la decisión sobre sus ancestros y su disponibilidad para la ciencia. "El esqueleto puede aportar mucha información", argumenta Stanford. "La clave de la cuestión es que pondrá de relieve las complejidades del poblamiento de América."

El trabajo de Stanford para recomponer el rompecabezas gigante de la arqueología americana es, con todo, una de las cosas más divertidas a las que puede dedicarse un adulto. "Es excitante", dice. "Te quita el tufillo de abogado que se te va criando." Y se ríe de nuevo, con estruendo.

Embriología

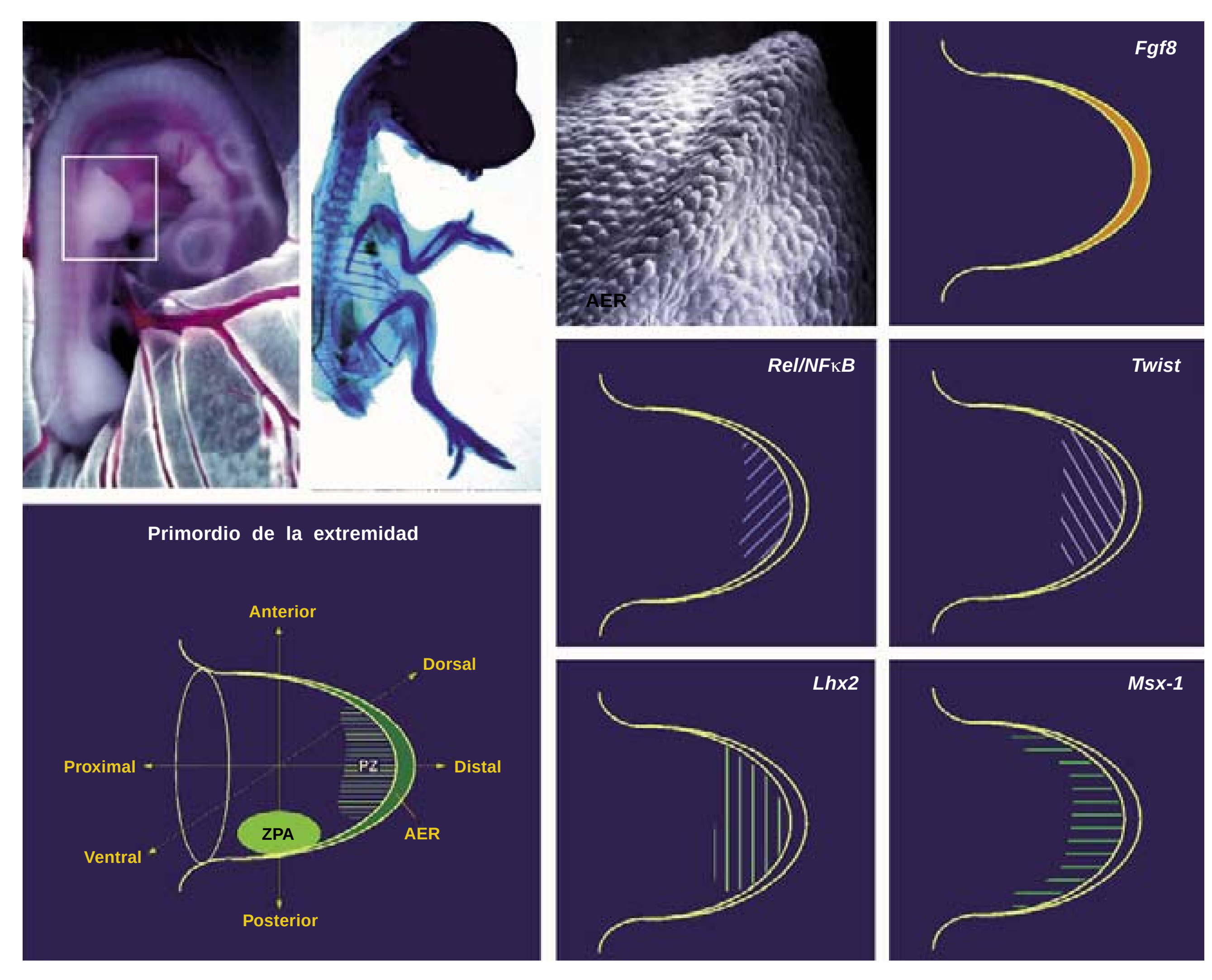
Factores de transcripción que controlan el crecimiento de las extremidades de vertebrados

Muchos defectos congénitos en humanos afectan al desarrollo de las extremidades. Pensemos en las distintas formas de enanismo o en las alteraciones del número de dedos. A menudo, las afecciones de las extremidades no se presentan aisladas. Se integran en síndromes o condiciones más complejas con patologías en otras regiones del cuerpo.

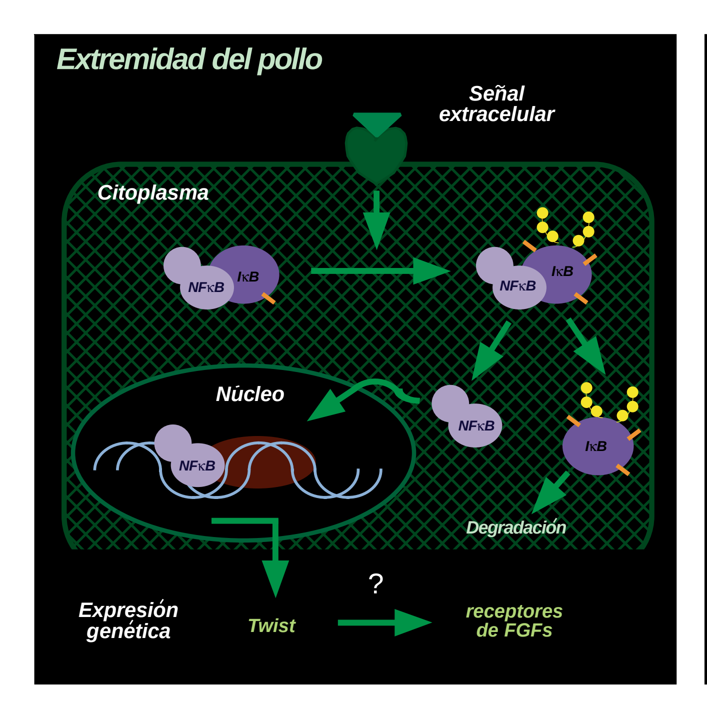
Algunos defectos congénitos están causados por alteraciones en los mecanismos moleculares que controlan el desarrollo de las extremidades durante la etapa embrionaria.

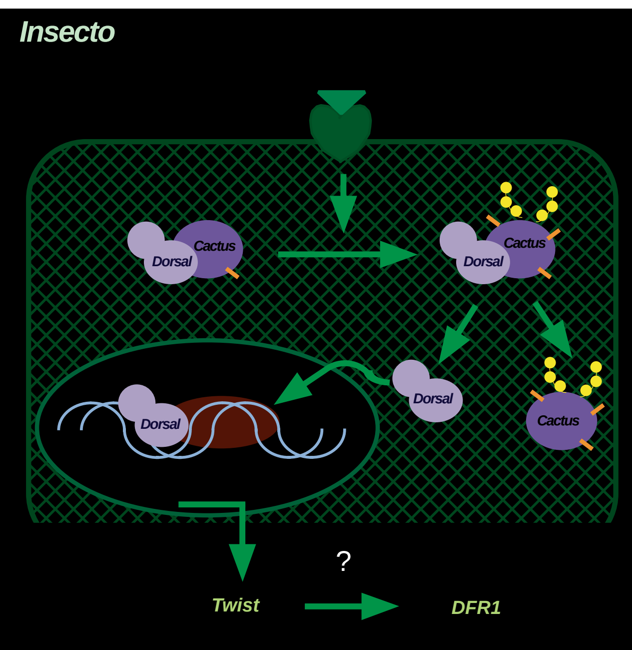
De la morfogénesis de las diferentes partes del embrión se encarga un grupo de genes que emplean similares estrategias moleculares para esculpir estructuras dispares. Ese mismo grupo de genes lo volvemos a encontrar, con funciones similares, en el ratón, la mosca, la rana o el pollo. De hecho, la biología del desarrollo se ha beneficiado enormemente de los estudios llevados a cabo en el embrión de pollo. Para profundizar en la base molecular del desarrollo de las extremidades, los métodos embriológicos clásicos (trasplantes de tejido) han aunado sus esfuerzos con cultivos de tejidos u órganos y técnicas bioquímicas.

Durante el desarrollo, los primordios de las extremidades aparecen en los flancos constituyendo pro-



1. Las células del primordio de la extremidad del pollo reciben información posicional con respecto a tres ejes morfológicos: anteroposterior, dorsoventral y proximodistal. Las regiones del primordio (ZPA, PZ, AER y ectodermo) poseen actividad organizadora de patrón, mediada por proteínas cuyos genes codificadores se expresan con patrones restringidos en el primordio. Por ejemplo, el gen Fgf8 *se expresa en la AER; los factores de transcripción codificados por los genes* Rel/NFkB, Twist, Lhx2 *y* Msx-1 *se expresan en la PZ*





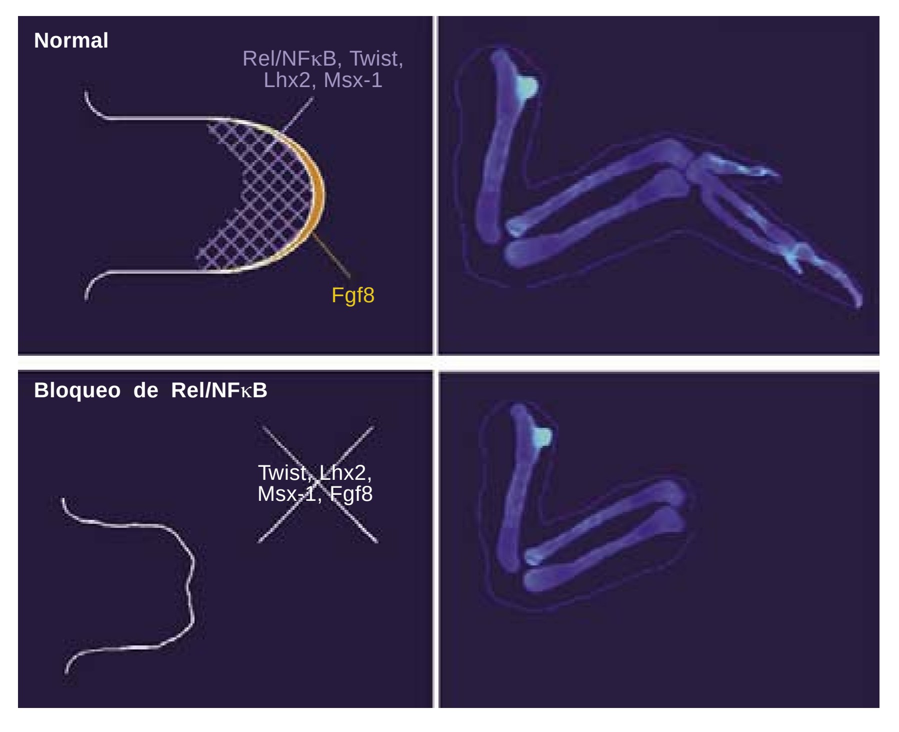
2. Comparación del mecanismo de translocación nuclear de Rel/NFκB en la extremidad del pollo y en el embrión de la mosca. En ambos casos, determinadas señales extracelulares promueven la fosforilación y degradación de IκB (o Cactus), lo que resulta en la entrada de NFκB (o Dorsal) en el núcleo, donde controlan la expresión de genes como twist*, que a su vez pueden operar sobre los genes que codifican los receptores de Fgf*

yecciones laterales de mesodermo, recubiertas de ectodermo. Durante el crecimiento de los primordios, el destino final de cada célula viene establecido por la información posicional que recibe de los centros organizadores.

En los primordios de las extremidades de vertebrados podemos distinguir tres ejes. Cada eje contiene un sistema de información posicional propio. El eje anteroposterior se extiende desde el pulgar —el elemento anterior de la extremidad superior humana— hasta el meñique, el elemento posterior; el eje dorsoventral, donde la porción ventral corresponde a la palma de la mano, y el eje proximodistal, en que el hombro constituye la parte proximal y, la punta de los dedos, la distal.

Conforme progresa el desarrollo de la extremidad, se van estableciendo diferencias de patrón en los tres ejes. En ello intervienen regiones específicas del primordio que poseen actividad organizadora de patrón. Con experimentos de corte clásico, en que se realizaban trasplantes de dichas regiones en posiciones ectópicas de un primordio receptor, se identificaron cuatro regiones o estructuras que se hallaban vinculadas con la actividad organizadora: zona de actividad polarizante (ZPA), ectodermo, cresta ectodérmica apical (AER)y zona de progreso (PZ).

La zona de actividad polarizante (ZPA), situada en la porción posterior del mesénquima del primordio, produce determinantes moleculares responsables de las diferencias a lo largo del eje anteroposterior. De las diferencias a lo largo del eje dorsoventral se encarga el ectodermo. La cresta ectodérmica apical, un engrosamiento del ectodermo en la



3. El bloqueo experimental de Rel/NFκB elimina la expresión de varios factores de transcripción en la PZ y resulta en extremidades truncadas, que carecen de los elementos más distales

parte distal del primordio, sintetiza factores necesarios para mantener el crecimiento y la elongación de la extremidad. La zona de progreso, grupo de células que residen en la porción distal del mesénquima, se mantiene en un estado de proliferación e indiferenciación.

Mediante trasplantes de tejido en embriones de pollo se descubrieron ya hace bastantes años algunas de estas regiones organizadoras. Pero sólo recientemente se ha logrado identificar moléculas que intervienen en actividades formadoras de patrón. Determinadas células de la ZPA expresan el gen *Sonic hedgehog* (*Shh*), que codifica una proteína de secreción que tiene la capacidad de organizar el patrón anteroposterior de la extremidad. Otras células de la AER producen Fgfs (factores de crecimiento de fibroblastos); estas proteínas de secreción actúan sobre las células de la PZ e inducen su proliferación. Las células de la PZ producen, entre otros, receptores para los Fgfs y factores de transcripción.

En nuestro laboratorio del Instituto Salk hemos estudiado el papel de cierto grupo de factores de transcripción, Rel/NFκB, en la zona de progreso. Estos factores, identificados primero en células *B* del sistema inmunitario, tienen la particularidad de que pasan del citoplasma al núcleo en respuesta a distintos estímulos extracelulares.

Las proteínas IκBs actúan inhibiendo la translocación nuclear de NFκB, reteniéndolo en el citoplasma. Los estímulos extracelulares fosforilan y degradan IκB, lo que deja NFκB libre para entrar en el núcleo; una vez aquí, regulan la transcripción de otros genes.

En la mosca del vinagre, *Drosophila melanogaster*, las proteínas Dorsal (homólogo de Rel/NFκB) y Cactus (homólogo de IκB) actúan a través de un mecanismo similar. Dorsal controla la expresión de Twist, otro factor de transcripción, necesario para la expresión de los receptores de Fgf. En el primordio de la extremidad de vertebrados, el gen homólogo a *twist* también se expresa en la PZ.

Para estudiar el comportamiento de Rel/NFκB decidimos bloquear su función en la extremidad del embrión de pollo. Nos servimos de un retrovirus que expresa una versión alterada de IκB que resiste la degradación; con ello se impedía la translocación de Rel/NFκB hacia el núcleo.

Al infectar los primordios de las extremidades con el retrovirus, se bloquea el crecimiento de la extremidad (extremidades truncadas) y en la PZ se reduce o se pierde la expresión de varios genes (*Fgfs, Lhx2, Msx-1, twist*). Se sabe de ratones con mutaciones en el gen *twist* que presentan las extremidades reducidas en tamaño; las mutaciones en el gen homólogo en humanos causan el síndrome de Saethe-Chotzen, en el que se observan anomalías en las extremidades, como por ejemplo reducción del tamaño de los dedos.

En los últimos años, distintas mutaciones en genes humanos que codifican otros factores de transcripción se han asociado con defectos congénitos de extremidades. Así, las mutaciones en genes *Msx, Hox, Spalt, Tbx, Gli* o *Pax* se asocian con síndromes complejos que incluyen defectos en las extremidades.

El caso de Rel/NFκB ilustra la importancia de los factores de transcripción en el desarrollo de las extremidades, desde la inducción del primordio (donde la acción combinada de genes *Hox* sitúa las regiones en las que los primordios van a aparecer en el flanco del embrión) hasta el mantenimiento del crecimiento de la extremidad (demostrado por el papel de Rel/NFκB en la PZ). La accesibilidad de la extremidad del pollo durante el desarrollo embrionario permite llevar a cabo experimentos que son imposibles de realizar en ratones o, por supuesto, en humanos.

ANA TAVARES, JAVIER CAPDEVILA
y JUAN CARLOS IZPISÚA BELMONTE
Instituto Salk
de Investigaciones Biológicas
La Jolla, California

Partículas quiméricas víricas

Nuevas vacunas

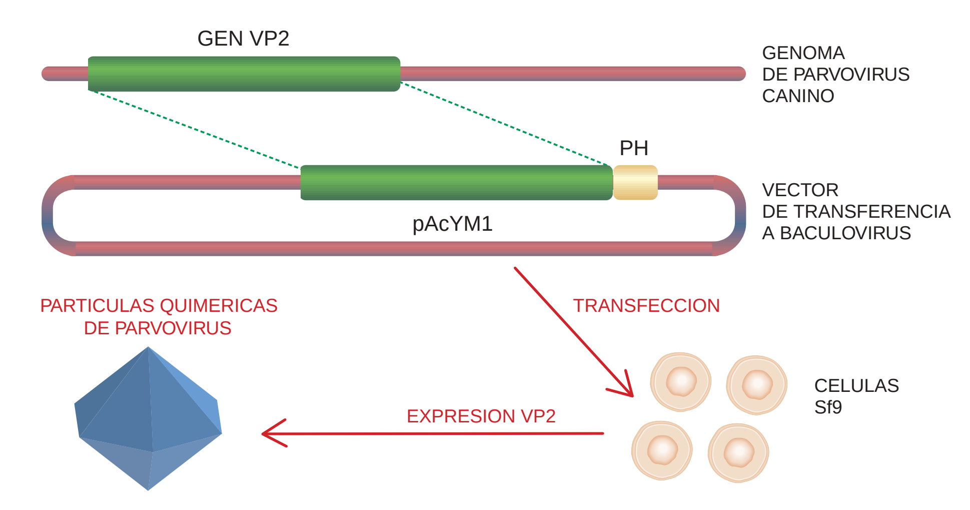
La vacunación constituye uno de los éxitos de la medicina moderna. A ella se deben la eliminación o control de la viruela, la poliomielitis, el cólera o el sarampión. En buena medida, la curva ascendente que presenta la demografía humana desde finales del siglo XIX hay que atribuirla al empleo generalizado de vacunas.

Desde que en 1796 Jenner describiera la antivariólica, han cambiado muchas cosas. Primero, se empleaba material biológico que portaba el germen; más tarde, fracciones purificadas o subfracciones de componentes del germen; por último, nuevas vacunas conseguidas con la técnica del ADN recombinante. Además, la ingeniería genética ha contribuido al descubrimiento de las hepatitis C y G. El arsenal de que se dispone ahora para la preparación de vacunas recombinantes es impresionante: vectores víricos y bacterianos vivos atenuados, que pueden multiplicarse en el huésped para potenciar la respuesta inmunitaria. Se han creado ya vacunas sintéticas y vacunas compuestas de ácidos nucleicos desnudos, que inducen protección sin integrarse en nuestros genes. Gracias a la ingeniería genética podemos reconstruir partículas víricas idénticas a las originales desde un punto de vista antigénico. No causan ningún daño al huésped porque carecen de material genético y no pueden, por tanto, replicarse.

Expliquemos el proceso mediante lo ocurrido con el virus de la hepatitis B (VHB). En el genoma del VHB, una vez clonado y secuenciado, se descubrió el gen *S*, que determina la cápside proteica del virus, integrada por 226 aminoácidos. Se observó también que el antígeno podía aislarse del plasma de pacientes enfermos del VHB en forma de partículas que contenían el antígeno de superficie del virus (HBsAg) en un complejo lipoproteico. Y se descubrió que estas partículas quiméricas víricas eran la unidad antigénica fundamental en la inducción de anticuerpos neutralizantes.

Ahora bien, las unidades componentes de la proteína S no son antigénicas. Pero la expresión del gen *S* en la levadura del pan, *Sacharomices cerevisiae*, permitió ensamblar partículas recombinantes en el citoplasma de las células, de donde posteriormente se purifican. Estas partículas víricas quiméricas de VHB derivadas de levadura se han registrado como vacuna y se han distribuido alrededor de 1500×10^6 dosis durante los últimos 10 años.

Las propiedades singulares del antígeno S del VHB y su notable capacidad para ensamblarse indujeron a pensar que estábamos ante un fenómeno único. Hoy, la estrategia de las partículas víricas reconstituidas se ha extendido al virus de la polio, rotavirus, virus del papiloma y parvovirus. Se insertan uno o más genes correspondientes a las proteínas de la cápside en vectores de transferencia a baculovirus. Introducidos en las



1. Esquema de la obtención de cápsides vacías de VP2 de parvovirus. PH: promotor de poliedrina; pAcYM1: vector de transferencia a baculovirus

células de insecto, los baculovirus producen, en presencia de ADN genómico vírico parental y por recombinación homóloga, baculovirus recombinantes. Al infectar células de insecto con estos baculovirus se produce la expresión de genes víricos en gran cantidad. Cuando se cumplen las condiciones adecuadas las proteínas recombinantes producidas se ensamblan dentro de las células de insecto, reconstruyendo la partícula vírica. Una partícula vírica quimérica es inmunogénicamente análoga al virus original pero sin material genético propio, con lo que se evita el peligro de la replicación en el huésped que pudiera conducir a mutaciones indeseables. La alta inmunogenicidad de estas quimeras víricas se debe precisamente a su carácter particulado, que permite un mejor reconocimiento e interacción con las células del sistema inmunitario. Algunas de esta partículas (rotavirus humano, papiloma) se encuentran actualmente en la fase clínica previa a su registro como vacuna comercial. Dada su alta inmunogenicidad, estas partículas víricas quiméricas pueden ser utilizadas como portadores de epítopos lineales: secuencias lineales del inmunógeno original que inducen la respuesta inmunitaria protectora en el huésped cuando se administran como péptidos o como componentes de una proteína de fusión.

Desde un enfoque algo distinto, se investiga en el desarrollo de vacunas recombinantes basadas en virus vegetales. Así se ha fusionado la secuencia correspondiente a un epítopo del parvovirus canino dentro del gen que determina la proteína de la cubierta del virus del mosaico del caopi (*Vigna unguiculata*), un garbanzo silvestre. El genoma vírico completo, con el componente que cifra la proteína de fusión incluido, se introdujo en las hojas de la planta de caopi; allí infectaba el tejido vegetal y se replicaba.

De las plantas infectadas con el virus modificado se aislaron y purificaron las partículas víricas quiméricas, que contenían el epítopo de parvovirus en su superficie. Con estas partículas se inmunizaron visones, expuestos luego a infección con el parvovirus virulento. Todos los animales resultaron protegidos contra la enfermedad.

La próxima etapa a cubrir estribará en utilizar la planta de vehículo portador de la vacuna en la ingesta. Ya se han dado algunos pasos en esa dirección. Se ha clonado, y expresado en patatas transgénicas, el gen de la cápside quimérica del virus de Norwalk, un calicivirus humano. Cuando se les dio de comer las patatas a los ratones, las cápsides quiméricas actuaron de inmunógenos orales.

Vemos, pues, en resumen, que la eficacia de las partículas quiméricas es superior a otras vacunas que se fundan en la expresión de proteínas individuales. Su alta inmunogenicidad combinada con la facilidad de producción hace suponer que este tipo de vacunas constituirá una de las alternativas más interesantes y seguras en el futuro.

JOSÉ IGNACIO CASAL
y CARMEN VELA
INGENASA, Madrid

2. Partículas víricas varias de parvovirus canino teñidas por tinción negativa y observadas con el microscopio electrónico

Pensionados en el XVIII

Los Delhuyar

Entre los contados españoles que ocupan asiento propio en la historia de la ciencia y la técnica se cuentan Juan José y Fausto Delhuyar, quienes lograron el aislamiento del wolframio en 1783.

Ambos nacen en Logroño; Juan José en 1754 y Fausto al año siguiente. Hijos de Juan Delhuyar, cirujano del Hospital y del Ayuntamiento de la ciudad, quien había cursado medicina



1. Fachada de la casa donde estuvo el Laboratorium chemicum *de la Real Escuela Metálica de Vergara en el que los Delhuyar aislaron el wolframio-tungsteno en 1783*

en París. Y allí los envió para que estudiaran medicina y química. Cinco años pasaron en la capital, donde recibieron también enseñanza en física, matemáticas e historia natural.

El año 1777, seleccionados por la Real Sociedad Bascongada de los Amigos del País (RSBAP) y pensionados por Carlos III, se trasladaron a la Bergakademie de Freiberg, el centro europeo que gozaba de mayor prestigio en metalurgia.

Fausto debía prepararse para ocupar la cátedra de mineralogía y metalurgia de la Real Escuela Patriótica, aneja al Real Seminario de Vergara y fundada a la sombra de la RSBAP por Javier M.ª de Munive, conde de Peñaflorida.

A Juan José la Secretaría de Estado de Marina de Carlos III le encomendaba otra misión, secreta. Una vez terminados sus estudios en la Bergakademie, y tras visitar los principales centros metalúrgicos de Europa, debía penetrar "*haciéndose pasar por alemán y del oficio*" en las fundiciones de cañones que los ingleses tenían en Carron, Escocia, dominar la técnica y traérsela a España.

Terminados sus estudios en Freiberg, era el momento de contrastar en el terreno industrial las lecciones teóricas. A mediados de 1781, se van a Viena para, desde allí, iniciar, juntos, una serie de visitas de trabajo a las instalaciones minero-metalúrgicas austríacas y de su entorno. Pasan sucesivamente por Presburgo (hoy Bratislava), Schemnitz, Kremnitz, Neushol, Herrengrund, Tajoba, Schmolnitz y otras.

En esas estaban, cuando Peñaflorida le indica a Fausto su vuelta inmediata para incorporarse a la cátedra de Vergara. Tras la oportuna organización de la asignatura y la puesta a punto de la sección metalúrgica del *Laboratorium chemicum*, inició las clases en 1782.

Juan José viajó por los países nórdicos. En Uppsala conoce al químico Torbern Bergman. Entusiasmado con él, suspende la *misión* y estudia a su lado durante seis meses. Bergman le entregó como material de prácticas una muestra de *tungsten*, mineral sueco (gemelo del *wolfram* alemán).

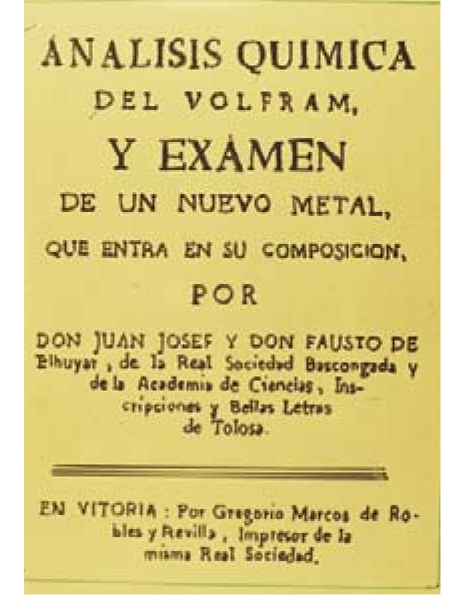
Conoce las instalaciones de Komsberg y Fahlum. Acude a Köping para visitar a K. W. Scheele. Recala por fin en París de 1783. Allí recibió la noticia de la cancelación de su beca y la orden de vuelta a España. En julio del 1783 está ya en Vergara.

Fausto estaba al corriente de las técnicas que Juan José utilizaba en el análisis de las muestras de *tungsten* recibidas de Bergman. Por su cuenta, había empezado ya el análisis del mineral *wolfram* que había traído de las minas Zinnualde en Sajonia. En 1781 Scheele escribía que los componentes del *tungsten* seguían siendo desconocidos para los químicos. Bergman sospechaba que se trataba de un metal, pues se había servido del *tungsten* para llegar a un óxido ácido.

Reunidos de nuevo, sumando los conocimientos especiales de Juan José a la experiencia de Fausto y disponiendo del *Laboratorium chemicum*, uno de los mejor dotados de Europa si creemos a A. N. Thunborg, iniciaron los ensayos. Lograron, en un tiempo sumamente breve, el aislamiento del metal que bautizaron con el nombre de "wolframio". En septiembre de 1783, trabajaban ya en la redacción de la "memoria técnica" del aislamiento.

Como primer material de estudio utilizaron *wolfram* (*spuma lupi*) de las minas de Zinnualde en la frontera de Sajonia con Bohemia, recogido en las excursiones posteriores a la Bergakademie. La memoria técnica consta de trece capítulos. Tras una revisión bibliográfica, indican la procedencia del mineral empleado, dan cuenta de los ensayos *por vía seca* y de sus resultados. Describen el tratamiento del mineral, disgregándolo, primero, con "álcali vegetal" en crisol y al fuego. Ensayan los residuos y deducen la presencia de hierro y manganeso. Con ácido clorhídrico el mineral generaba un polvo amarillo (ácido wolfrámico o túngstico) que entienden es el mismo obtenido por Scheele con *tungsten* (scheelita). Lo confirman con mineral scheelita que mandan traer de Bohemia.

Continúan ensayando y atacando el polvo con álcalis y ácidos, para obtener al fin el "trióxido de wolframio" (WO_3 65 %) y la proporción de los otros componentes (Fe y Mn). Después de digerir con sosa, confirman el carácter del trióxido de W, utilizando ácido nítrico. Obtienen el peso específico del ácido wolfrámico (6,12), válido hoy día. Luego lo ensayan a la llama, con y sin fundentes. Continúan el estudio de las propiedades químicas del trióxido de W y anotan la respuesta de la *sal blanca* a la fusión por soplete, a la calcinación, a la acción de ácidos nítrico, clorhídrico y sulfúrico. Al atacar con *álcali volátil* (amoníaco)



ANALISIS QUIMICA
DEL VOLFRAM,
Y EXÁMEN
DE UN NUEVO METAL,
QUE ENTRA EN SU COMPOSICION,
POR
DON JUAN JOSEF Y DON FAUSTO DE Elhuyar, de la Real Sociedad Bascongada y de la Academia de Ciencias, Inscripciones y Bellas Letras de Tolosa.

EN VITORIA: Por Gregorio Marcos de Robles y Revilla, Impresor de la misma Real Sociedad.

2. Portada de la Memoria Técnica del aislamiento del wolframio cuando se publicó en Vitoria en 1784



3. Una pieza de wolframita (wolfram) que figura en una vitrina del Museo de Minerales en el Hotel Palacios de Alfaro (La Rioja)

logran un producto intermedio, de alta significación hoy, el *paratungstato amónico*, para obtener wolframio.

El capítulo undécimo, el definitivo de la Memoria, describe la fase decisiva que da lugar al aislamiento del W. Siguiendo un procedimiento que hoy se denomina *metalurgia de los polvos*, mezclando perfectamente trióxido de W con carbón en un crisol de cerámica de Zamora, cerrado hermético y calentado a fuego vivo hora y media, reducen el trióxido y rompiendo el crisol, *después de frío*, logran aislar el W metal.

Conscientes de que han obtenido un nuevo metal, entran en una fase de múltiples aleaciones con todos los metales de que disponen. Aportan los caracteres de cada aleación. Por fin, basados en los resultados de la investigación, dejan sentado que han logrado un nuevo metal del que enuncian sus propiedades distintivas.

Acuñan el nombre que deben imponer al nuevo elemento, guiados por el mineral de origen: wolframio, cuya inicial es la que figura en la Tabla Periódica. La memoria técnica se tradujo al francés, inglés, alemán y sueco. En reconocimiento, sus autores fueron nombrados socios de las principales Academias de Europa.

Hoy día, el 70 % de W se obtiene de chatarra, wolframita y scheelita. El W se utiliza como polvo de carburo de W y es utilizado para brocas, matraces, troqueles, hilo de W para filamentos, electrodos, lámparas de destello, pantallas de TV, pantallas de rayos X, válvulas electrónicas, productos químicos, curtientes, mordientes, catalizadores, blindajes para radiaciones, proyectiles espaciales, W radiactivo y otros.

JESÚS PALACIOS
Universidad de la Rioja,
Logroño

Manchas solares

Flujo magnético

La actividad solar se produce por la emergencia de flujo magnético a través de la fotosfera, constituyendo el ciclo de manchas una de sus manifestaciones.

El campo magnético general del Sol, de intensidad muy débil, tiene naturaleza poloidal, a diferencia del campo magnético de las manchas. Los grupos de manchas, generalmente bipolares, aparecen en la superficie del astro con una alineación este-oeste; esa disposición sugiere que su campo magnético posee carácter toroidal. La intensidad de este campo multiplica por mil la intensidad del campo magnético general del Sol. En cada nuevo ciclo de manchas, la polaridad magnética de los grupos se invierte y, con ello, se pone de manifiesto la existencia de un ciclo magnético de unos 22 años.

La teoría de la dínamo explica la formación de los tubos de flujo magnético, en el interior del Sol, mediante la combinación de dos mecanismos: la rotación diferencial, que permite transformar un campo magnético poloidal en otro toroidal, y la convección, que confina espacialmente el campo magnético.

Una vez formados, los tubos de flujo se almacenan en la zona de transición entre la zona radiativa y la convectiva, ascendiendo posteriormente hasta emerger por la superficie del Sol. Este ascenso es debido a que la densidad del plasma en el interior del tubo es menor que la del medio que le rodea y, de acuerdo con el principio de Arquímedes, el tubo asciende. Las simulaciones teóricas han demostrado que, para que el flujo magnético no se difumine durante el ascenso, es necesario que el tubo de flujo esté retorcido.

Las zonas donde el tubo de flujo corta la superficie solar son las manchas solares. La polaridad magnética de la mancha delantera siempre es igual que la del hemisferio en el que se encuentra, mientras que la trasera presenta la polaridad opuesta.

La probabilidad de que emerja nuevo flujo magnético en una región de manchas ya constituida es mucho mayor que la de que emerja en una zona sin manchas. Por ello, la emergencia sucesiva de tubos de flujo magnético incrementa el número de manchas presentes en una región activa y, en general, aumenta la complejidad magnética de la región. Las regiones activas de complejidad magnética elevada son las mejores candidatas a producir fulguraciones solares altamente energéticas. Recientemente, se han aportado indicaciones observacionales que lo confirman.

¿Cómo desaparece el flujo magnético de la superficie del Sol? Mediante el transporte de flujo magnético por flujos de materia a lo largo de los meridianos. Las manchas traseras, de polaridad contraria a la del hemisferio en el que se encuentran, se fragmentan; los fragmentos son arrastrados hacia los polos y allí se produce la cancelación de la polaridad dominante. Al final, la llegada incesante de flujo provoca la inversión de polaridad pocos años después del comienzo del nuevo ciclo.

Pese a que el ciclo de manchas se ha mantenido bastante regular durante siglos, hubo períodos de actividad solar muy baja, sin apenas manchas sobre la superficie del Sol. La primera prueba fue proporcionada por el astrónomo inglés Maunder, quien puso de manifiesto la ausencia de manchas entre 1645 y 1715. Después

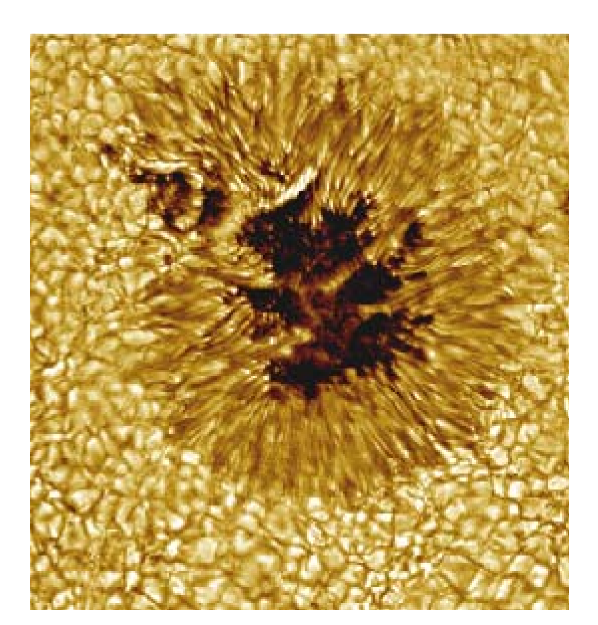


Imagen de una mancha solar con una resolución espacial cercana a 100 km tomada con el telescopio solar de Sacramento Peak (Cortesía del Observatorio Solar Nacional de Estados Unidos)

de 1715, el ciclo solar volvió a su regularidad, aunque se registró otra ligera disminución en el nivel de la actividad solar entre 1795 y 1823, intervalo que se conoce por mínimo de Dalton.

Hay pruebas indirectas de que entre 1100 y 1200 se produjo un aumento en el nivel de actividad solar, el máximo medieval, mientras que entre 1450 y 1550 se asistió a otro mínimo de actividad, el de Spörer.

¿A qué obedecen estas perturbaciones de la aparente regularidad del ciclo solar? La respuesta podemos buscarla, y quizás encontrarla, en las ecuaciones no lineales de la magnetohidrodinámica, que gobiernan la actividad magnética del Sol. Algunos han sugerido que el ciclo de actividad solar pudiera ser caótico y han estudiado el comportamiento de sistemas de ecuaciones diferenciales no lineales que pretenden representar el funcionamiento de la dínamo solar.

Mediante ese aparato formal podemos determinar los regímenes de funcionamiento regular y caótico, obtener los atractores y comparar el comportamiento de las soluciones con el de la actividad solar. La variación del número dínamo D, parámetro que representa la eficiencia de la dínamo, permite obtener los diferentes regímenes. Por ejemplo, en un sistema de sexto orden cuando D es mayor que 3,8 el comportamiento del sistema se convierte en caótico; sin embargo, dentro de la evolución caótica aparecen intervalos temporales en los que el comportamiento es cuasiperiódico e intervalos con episodios de actividad muy reducida. Estos episodios son semejantes a los grandes mínimos observados en la actividad solar.

Las simulaciones en cuestión sugieren que el ciclo de actividad solar podría ser un fenómeno caótico. Sin embargo, para confirmarlo, se ha de demostrar que el atractor solar es extraño, es decir, que su dimensión es fractal. Una consecuencia importante de un posible comportamiento caótico sería la imposibilidad de predecir el comportamiento futuro de la actividad solar. Durante los últimos quince años se han llevado a cabo muchos estudios utilizando datos relacionados con la actividad solar, pero los resultados son contradictorios. Probablemente, la falta de una serie temporal de datos suficientemente larga dificulta la obtención de conclusiones fiables.

Existen otras “irregularidades” en el comportamiento de la actividad solar. Por ejemplo, es ligeramente asimétrica entre hemisferios, es decir, la emergencia de flujo magnético no es igual en ambos hemisferios. Durante largos períodos existe más actividad en un hemisferio que en el otro, comportamiento que luego se invierte. Durante el pasado ciclo 22, el hemisferio sur ha sido dominante; muy probablemente, esta dominancia se mantendrá en el ciclo 23 que acabamos de comenzar.

Cualquier teoría que se proponga explicar el funcionamiento de la actividad fotosférica ha de encerrar potencia suficiente para dar cuenta de todos los aspectos anteriores. La dínamo solar explica, a grandes rasgos, la actividad magnética del Sol; sin embargo, los detalles más finos de cuándo, cómo, dónde y por qué emerge el flujo magnético todavía se nos escapan.

José Luis Ballester
Departamento de Física.
Universidad de las Islas Baleares,
Palma de Mallorca

Enfermedad de Parkinson

Circuitos talámicos de retroalimentación

Los ganglios basales constituyen un conjunto de estructuras del sistema nervioso central relacionadas de manera directa con el control de la conducta motora. No sólo. Se encuentran también implicados en aspectos cognitivos y motivacionales del comportamiento humano. Su conectividad aferente les permite acceder a información procedente prácticamente de todas las áreas corticales. Junto a ello, también reciben importantes contingentes procedentes de ciertos núcleos talámicos, así como de algunos núcleos del tronco del encéfalo.

Las proyecciones de salida de los ganglios basales se dirigen esencialmente al tálamo. Desde allí acceden a la corteza cerebral, y casi exclusivamente a su lóbulo frontal. Pero no limitan a regiones corticales su rango de influencia; ciertos núcleos del tronco del encéfalo también reciben fibras descendentes procedentes de los ganglios basales.

En los últimos años se ha progresado en el conocimiento de la compleja conectividad establecida entre los componentes de los ganglios basales. Según parece, estas proyecciones comparten varios rasgos: carácter unidireccional (las señales se dirigen desde los núcleos de entrada hacia los de salida), especificidad de las conexiones, heterogeneidad neuroquímica y neurofisiológica de las poblaciones celulares interesadas y, por fin, estrecha vinculación funcional existente entre proyecciones.

El carácter unidireccional de las conexiones no obsta para que se den circuitos de retroalimentación entre los diversos componentes de los ganglios basales. El más conocido es el constituido por las fibras dopaminérgicas; desde la porción compacta de la sustancia negra se dirigen hacia el estriado, cuya degeneración provoca la enfermedad de Parkinson. Otras estaciones de relevo intermedias —la porción lateral del globo pálido o el núcleo subtalámico— están cobrando interés por su participación e influencia en la elaboración de las respuestas de los ganglios basales. Cabe, además, que la información transmitida por sus núcleos de salida controle a su vez la entrada a los

ganglios basales mediante las fibras que, desde los núcleos talámicos que reciben axones de la porción medial del globo pálido y de la porción reticulada de la sustancia negra, se dirigen al estriado.

El desarrollo del estudio neurobiológico de estas estructuras se ha visto favorecido por la estrecha relación que poseen con el esclarecimiento fisiopatológico de ciertos trastornos del movimiento vinculados a sus alteraciones: enfermedad de Parkinson, corea de Huntington o hemibalismo.

Se caracteriza la enfermedad de Parkinson, descrita ya desde antiguo como parálisis agitante, por la paradójica combinación en sus manifestaciones clínicas de una disminución motora global del paciente, junto a la presencia de temblor en situación de reposo. La alteración de las células dopaminérgicas de la sustancia negra desencadena trastornos en cascada de la actividad neuronal de las estaciones de relevo de los ganglios basales.

El descubrimiento de la L-dopa, precursor del neurotransmisor deficitario del Parkinson, la dopamina, con capacidad para alcanzar el sistema nervioso mediante su administración periférica, permitió arrinconar los primeros intentos de tratamiento quirúrgico de estos procesos. Esta terapéutica, aunque carente de base etiológica, parecía actuar sobre el problema fisiopatológico involucrado en la alteración; pero sus efectos eran transitorios y disminuían al cabo de una larga administración. Otros fármacos posteriores lograron frenar la degradación de la dopamina. No obstante, seguimos sin contar con sustancias capaces de actuar sobre las causas del proceso degenerativo.

La mayor precisión alcanzada en la localización de estructuras del cerebro humano mediante técnicas de imagen, el refinamiento del equipamiento quirúrgico y el propio progreso de la neurología han invitado a volver la mirada hacia la cirugía.

Las técnicas quirúrgicas de tratamiento de la enfermedad de Parkinson se dividen en destructivas y estimulativas. Se dirigen a la porción medial del globo pálido, al núcleo subtalámico o al núcleo ventral intermedio, uno de los núcleos talámicos asociados con los ganglios basales. La eficacia de la cirugía difiere en cada caso.

Mientras que la actuación sobre el tálamo se dirige contra el temblor, la de la porción medial del globo pálido es más efectiva frente los problemas de locomoción y la discinesia producida por la L-dopa. La estimulación es cada vez más utilizada por las ventajas terapéuticas que presenta, así como por su menor número de efectos secundarios.

El problema fundamental que afecta a las terapéuticas farmacológicas y quirúrgicas es el de conseguir suficiente especificidad de actuación para que no provoquen alteraciones en el resto de estructuras y funciones relacionadas con los ganglios basales.

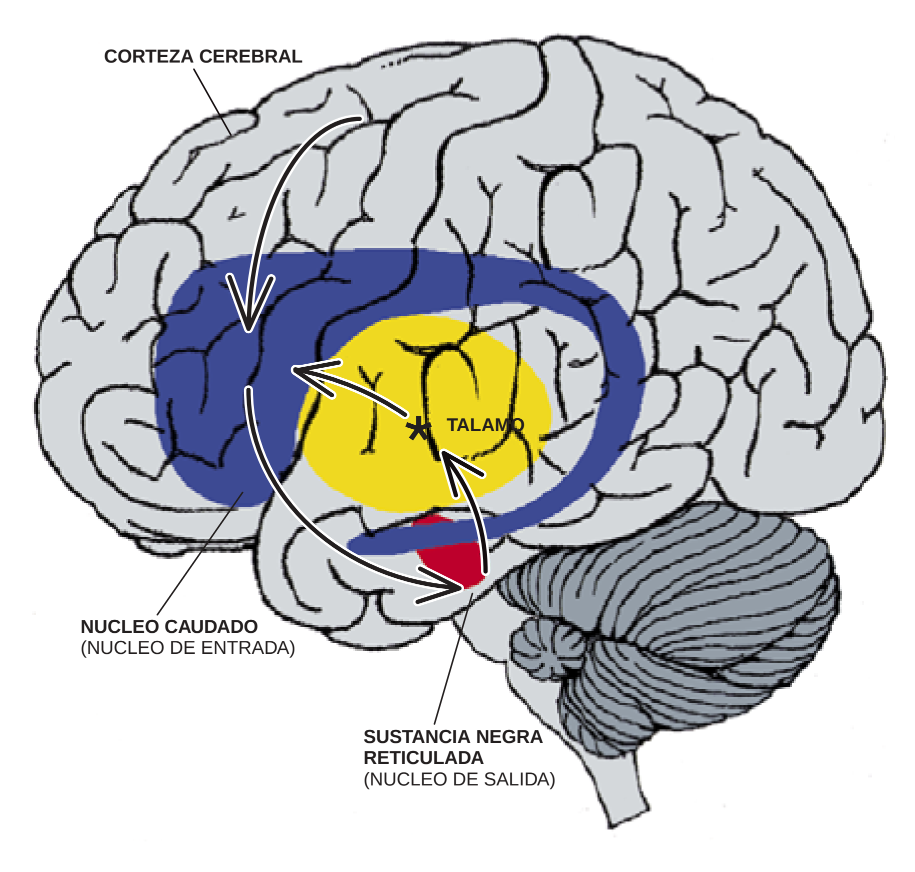
En el marco de esta situación, nuestra investigación se centra en la búsqueda de lugares talámicos mucho más selectivos, que posibiliten un mayor rendimiento terapéutico de la cirugía estereotáxica. Así, por medio de trazadores neuronales anterógrados y retrógrados, estamos acotando zonas talámicas donde podrían producirse circuitos de retroalimentación de los ganglios basales.

Nos proponemos cartografiar áreas talámicas que reciban fibras desde los núcleos de salida de los ganglios basales y a su vez envíen sus axones a los núcleos de entrada. En nuestro modelo experimental, seleccionamos la porción reticulada de la sustancia negra como núcleo de salida de los ganglios basales; en ella realizamos inyecciones de un trazador anterógrado de suerte que, captado por los cuerpos de las neuronas de esta región, se transporte hasta sus terminales en el tálamo.

Como núcleo de entrada escogimos el núcleo caudado. Le inyectamos trazadores retrógrados fluorescentes que, una vez captados por los terminales axónicos de la región, permiten observar los cuerpos neuronales a los que estos terminales pertenecen.

Con este procedimiento neuroanatómico, hemos revelado la existencia de algunas zonas del tálamo donde existe un solapamiento entre la llegada de fibras desde la porción reticulada de la sustancia negra y neuronas que proyectan hacia el núcleo caudado. Estas áreas son amplias y abundantes en las porciones rostrales del grupo talámico ventral, y más restringidas en los núcleos intralaminares rostrales y caudales.

Estas zonas talámicas podrían ser unos blancos selectivos para la cirugía estereotáxica relacionada con el tratamiento de las patologías de los ganglios basales. Sin duda, la cirugía del futuro podrá acometer intervenciones muy precisas sobre estas regiones que, por constituir zonas



Esquema que muestra el tálamo como posible asiento de circuitos de retroalimentación entre la entrada y la salida de los ganglios basales

que permiten establecer circuitos de retroalimentación dentro de los ganglios basales, quizá supongan una vía para actuar sobre grandes territorios de los mismos.

SILVANO DE LAS HERAS
Depto. de Morfología,
Facultad de Medicina
de la Universidad Autónoma,
Madrid

ELISA MENGUAL
y JOSÉ MANUEL GIMÉNEZ AMAYA
Depto. de Anatomía,
Facultad de Medicina
de la Universidad de Navarra

Sistemas expertos

Prueba diagnóstica

El test basal, NST (de “non-stress test), es una prueba diagnóstica utilizada en obstetricia para el seguimiento del embarazo en sus últimas fases. De manera especial se indica para interpretar situaciones indeseables que pueden sobrevenir en embarazos de alto riesgo.

La prueba consiste en el análisis de la señal de frecuencia cardíaca fetal. De dicha señal se estudian la línea de base, la variabilidad, número y amplitud de las aceleraciones de la señal sobre la línea de base, así como el número, amplitud y tipo de deceleraciones.

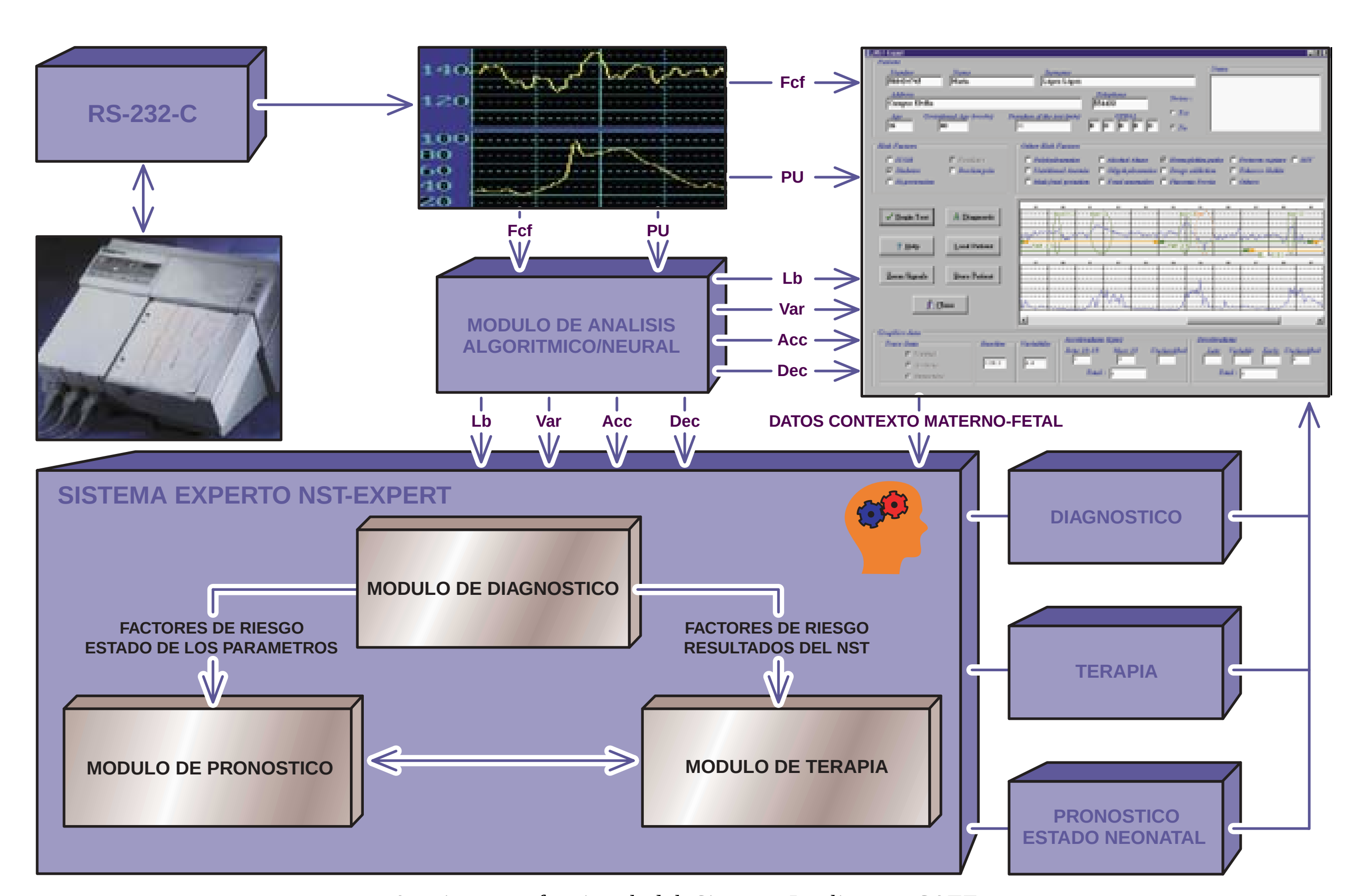
A través del análisis contextual de estos cuatro parámetros se obtiene el grado de bienestar fetal. Un resultado positivo del test basal indica una evolución normal del feto. Por el contrario, un resultado negativo del NST sugiere realizar pruebas complementarias y, en determinados casos, la inducción del parto para prevenir o paliar situaciones de compromiso fetal.

La interpretación de los parámetros del test requiere un análisis contextual detenido. Deben considerarse la edad gestacional, la presencia o ausencia de factores de riesgo materno y el estudio simultáneo de la señal de presión uterina.

La identificación por medio del test basal de una situación de taquicardia fetal moderada, por ejemplo, puede reconsiderarse como normal, si la madre ha ingerido cafeína antes de someterse a la prueba. En el mismo orden, una variabilidad mínima de la señal podría estar justificada si la madre se halla bajo los efectos de fármacos o drogas. También, la edad gestacional es un factor contextual importante a la hora de clasificar el número de aceleraciones espontáneas del feto en función de su amplitud. Por último, la clasificación del tipo de deceleraciones no puede realizarse sin una correlación temporal entre la señal de frecuencia cardíaca fetal y la ocurrencia de contracciones uterinas.

La naturaleza simbólica de la interpretación del test basal, la posibilidad de generar pronósticos sobre el grado de bienestar fetal y los aspectos contextuales que hay que tener en cuenta para prescribir terapias correctas, ofrecen las condiciones para abordar el dominio desde la óptica de la Inteligencia Artificial.

Hace más de una década, preparando la tesis doctoral en físicas, investigué la posibilidad de utilizar sistemas expertos para facilitar la interpretación de pruebas antenatales. El proyecto —denominado FOETOS, y dirigido por Carlos Hernández y Juan E. Arias— nos reveló que el dominio elegido inicialmente era demasiado ambicioso para su modelización computacional completa. Con todo, los resultados preliminares permitían abrigar esperanzas razonables sobre el



Arquitectura funcional del Sistema Inteligente CAFE

futuro de la inteligencia artificial en su aplicación a la obstetricia.

En 1988 me trasladé al departamento de ingeniería biomédica de la facultad de medicina de la Universidad de Georgia. Allí se definieron los objetivos y requisitos de diseño de un nuevo prototipo, el NST-EXPERT, capaz de producir interpretaciones adecuadas en un subdominio de FOETOS: el test basal. Lawrence D. Devoe, John R. Searle y Vicente Moret colaboraron en el desarrollo del nuevo sistema. Desde entonces, NST-EXPERT ha dado pasos importantes.

De nuevo en España, Bertha Guijarro y Oscar Fontenla se incorporaron al proyecto. La versión actual del sistema inteligente, que recibe el nombre de CAFE (Computer Aided Fetal Evaluator), es uno de los pocos sistemas híbridos fuertemente acoplados que se pueden encontrar en la bibliografía científica. CAFE incluye, además de al sistema experto NST-EXPERT, un modelo neuronal para el análisis y clasificación de los patrones que pueden derivarse del estudio de las señales cardiotocográficas, frecuencia cardíaca fetal y presión uterina.

Una vez identificados los patrones, y eliminados los artefactos instrumentales, la información resultante se analiza en el módulo de diagnóstico del sistema inteligente. Este módulo, de naturaleza inferencial, emplea el paradigma de programación orientada al objeto para la representación del conocimiento declarativo y el paradigma de reglas de producción para la representación del conocimiento procedimental.

Los factores contextuales utilizados en el módulo para la interpretación del test son: crecimiento intrauterino retardado, hipertensión materna, post-datismo y diabetes. Si la interpretación del test da un resultado positivo, el sistema infiere un estado fetal satisfactorio. En este caso no se requieren acciones complementarias a las del seguimiento protocolorario normal del embarazo. Pero si la interpretación efectuada por el sistema revela síntomas de compromiso fetal, la información se transfiere al módulo de pronóstico, donde se cuantifican situaciones típicas (e.g.: Apgar menor de 7 a los 5 minutos del nacimiento, acidosis fetal, distrés fetal, etc.) Para evaluar dichas posibilidades el módulo de pronóstico de NST-EXPERT pone en ejecución un modelo de razonamiento impreciso cuasi-estadístico basado en los factores de certidumbre de Shortliffe y Buchanan.

Una vez cuantificadas las posibilidades, los resultados son presentados al usuario según una escala lingüística con cuantificación borrosa. La información se transfiere a un módulo de evaluación terapéutica para su análisis. Este módulo, de naturaleza inferencial también, presenta una estructura parecida a la del módulo de diagnóstico. Las sugerencias terapéuticas son del tipo "...realizar una amniocentesis para investigar la madurez fetal. Si el feto es maduro..."

El NST-EXPERT ha pasado de forma satisfactoria las pruebas de diagnóstico, pronóstico y terapia realizadas en el hospital clínico de la facultad de medicina de la Universidad de Georgia y del hospital materno-infantil Teresa Herrera de La Coruña. Se trabaja ahora en la adaptación de la arquitectura del NST-EXPERT para integrarlo en los sistemas de información hospitalaria.

AMPARO ALONSO BETANZOS
Universidad de La Coruña

Ciencia económica

Final de siglo

La economía es muy útil; algunos de los principales problemas de la humanidad en el siglo XXI serán problemas económicos; sus avances en la centuria que acaba han sido notables. Pero, ¿es verdaderamente una ciencia? ¿No se ha llegado a decir que la concesión de premios Nobel de economía no está justificada?

Puede acaecer que estemos hablando de una ciencia incipiente, cuyo caminar científico comenzó tardíamente. El siglo XVII vio florecer en Europa la física, la astronomía, las matemáticas; en economía hubo que esperar, sin embargo, hasta finales del XVIII para que apareciera, con Adam Smith, el primer economista "clásico".

En los dos siglos transcurridos la economía ha registrado muchos cambios en principios, métodos y conclusiones, sin que exista un claro hilo conductor. La falta de uniformidad del pensamiento económico revela gran riqueza de ideas, pero también ausencia de una base científica indiscutida.

El fin de siglo propicia balances y reflexiones. Cambridge University Press reedita un libro de un destacado economista sobre teoría e his-



Zona industrial de Piombino

toria económicas; en él se recogen unas conferencias dictadas por su autor, Charles P. Kindleberger, en 1980 (*Economic Law and Economic History,* 1997).

¿Qué ha cambiado desde entonces? En la historia económica ha habido un suceso principal: la desaparición de los sistemas de asignación de recursos mediante la planificación central. También se han registrado otros hechos: el Estado interviene menos en el hacer económico, el desempleo se ha extendido, las transacciones en los mercados financieros se han decuplicado, la integración europea se ha acelerado, parte de Asia ha crecido mucho, e Iberoamérica y Africa han salido mal que bien de su marasmo. Ricos y pobres, sin embargo, siguen muy distanciados entre sí, unos y otros no logran asegurarse un desarrollo sostenido, y la inestabilidad económica y financiera acecha a todos.

Entre tanto, la teoría económica progresa, pero no resuelve plenamente casi ningún problema. Se achaca a los teóricos falta de contacto con la realidad. Kindleberger equipara algunas investigaciones económicas con buscar en el punto B un anillo perdido en el punto A, simplemente porque en B hay más luz...

Nadie predica ya una economía socializada, pero nadie se pone de acuerdo sobre cuál es el grado óptimo de intervención estatal. Tampoco se ha encontrado la fórmula científica del desarrollo y en cuestión tan crucial sigue avanzándose a tientas. La llamada globalización o mundialización de la economía no se sabe si repartirá beneficios por doquiera o arrinconará a los países pobres. Para evitar la inestabilidad de los sistemas financieros y frenar la especulación, ¿qué cabe hacer? ¿Los beneficios de la unión monetaria europea serán claramente superiores a sus inconvenientes?

Kindleberger escribió uno de sus libros más conocidos sobre la depresión de los años treinta. De aquella mala experiencia, al igual que otros economistas, procuró extraer lecciones para el futuro. En 1980, sin embargo, se cura en salud y no nos ofrece receta alguna para evitar los nocivos altibajos del acontecer económico. Tiene entonces Kindleberger setenta años y ha dedicado cincuenta al estudio de la economía. Su conclusión: el economista es como un orfebre que tiene muchas herramientas a su vera y ha de elegir con tino en cada caso la más apropiada. ¿Deberá entonces el economista teórico o práctico guiarse por la intuición del buen artesano? ¿No son posibles criterios más científicos?

Kindleberger habla del factor trabajo y razona con elegancia sobre la oferta de mano de obra y las consecuencias de su abundancia o escasez para el desarrollo económico. Se preocupa por una posible penuria de trabajadores que amenace el crecimiento de los países ricos. No prevé, en cambio, lo que ocurriría después de 1980: el desarrollo con desempleo. Y es que la previsibilidad no es un atributo de la ciencia económica.

Sobre los mercados financieros, dice nuestro autor que por lo general son estables, hasta que dejan de serlo, cambian los precios y se cumple la ley de Gresham ampliada de que un activo expulsa a otro. Los valores bursátiles, por ejemplo, se aprecian y deprecian por motivos reales o imaginarios, con oscilaciones que pueden ser muy amplias. ¿Qué solución hay? Nada ha encontrado hasta hoy la ciencia económica para evitar que sobre los mercados financieros, con su grande e inevitable especulación, se cierna una amenaza perenne de desequilibrio. Unos desequilibrios que, cuando se producen, frenan el crecimiento y, cuando se extienden, conmocionan a la economía toda del planeta.

La ciencia económica hace lo que toda ciencia: plantearse preguntas, pero sólo encuentra atisbos de respuesta. Tantea, palpa la realidad, le da vueltas, pero halla pocos poros por donde introducirse. La labor del economista sigue siendo artesanal. ¿Dejará de serlo algún día? ¿Verá el siglo XXI el asentamiento científico del saber económico? Si así fuera, miles de millones de personas mejorarían su suerte. Se cumpliría con ello lo que anunció Keynes en 1930, en una conferencia que pronunció en Madrid, cuando predijo que los problemas de nuestros nietos no serían mayormente económicos. Hoy, sin embargo, esa idea optimista no se dibuja en el horizonte y la economía parece abocada a seguir siendo durante largo tiempo un conocimiento problemático, poco riguroso, casi no científico. Tal vez, en los albores del tercer milenio, tengamos que confesarnos humildemente la insuficiencia de nuestros actuales instrumentos intelectuales

para prever y ordenar cabalmente el discurrir económico.

FRANCISCO BUSTELO
Universidad Complutense
Madrid

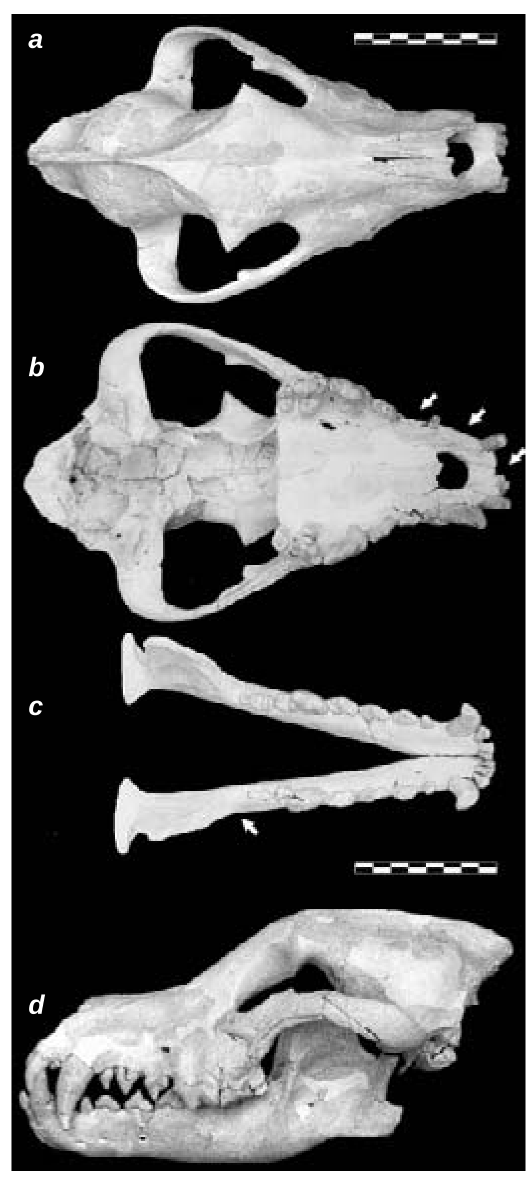
Pleistoceno inferior

Perros salvajes

La familia de los Cánidos abarca ahora lobos, perros, zorros, coyotes y licaones. Desde hace unos dos millones de años hay rastros fósiles de los cánidos modernos en la península Ibérica. En el registro paleontológico resalta la presencia de *Canis* (*Xenocyon*) *falconeri*, con ejemplares bien conservados en el yacimiento de Venta Micena (Orce, Granada).

C. falconeri constituye una especie grande. De talla similar a la de los lobos modernos, su dentición da fe de una alimentación hipercarnívora, en la que la carne proveniente de presas vertebradas representaría más del 70 % de la dieta. En su esqueleto llama la atención el segundo metacarpiano, que muestra una faceta de articulación con el primero muy reducida, lo que sugiere que carecían de este último hueso, lo mismo que el licaón africano, único cánido moderno que presenta una extremidad tetradáctila.

La excavación efectuada en el verano de 1995 en el yacimiento de Venta Micena suministró un cráneo completo de *C. falconeri*, con la mandíbula en conexión anatómica. Pertenecía a un individuo adulto con dentición permanente y moderadamente desgastada. Se trata del ejemplar más completo de los que se conocen.



Vistas sagital (a), *bucal* (b), *mandibular* (c) *y lateral* (d) *del cráneo de* Canis (Xenocyon) falconeri *de Venta Micena (espécimen VM-7000). Las flechas marcan las ausencias de dientes*

La mandíbula presenta anomalías óseas y dentarias, relacionadas con un importante grado de asimetría craneana bilateral. Carece de diversos dientes, concretamente los dos primeros incisivos, el canino y el segundo premolar de la serie superior derecha; faltan también el segundo y el tercer molar de la serie mandibular derecha. El canino superior y el tercer molar inferior nunca llegaron a erupcionar durante la vida del animal. Es más, sus gérmenes dentarios no aparecen en las radiografías y tomografías, señal de que tales piezas no llegaron a formarse.

Las asimetrías fluctuantes representan ligeras desviaciones de la simetría bilateral perfecta, motivadas por perturbaciones del desarrollo ontogenético. Existe, al parecer, una relación entre grado de asimetría y homocigosis de los polimorfismos enzimáticos. En lo concerniente a carnívoros, el estudio del equipo dirigido por Stephen J. O'Brien sobre guepardos (*Acinonyx jubatus*) procedentes de Sudáfrica comprobó la ausencia de heterocigosis genética en los aproximadamente 60 loci aloenzimáticos muestreados.

La pérdida de variabilidad genética en los guepardos se produjo como consecuencia de una severa reducción en el tamaño de sus poblaciones a finales del Pleistoceno, hacia el término de la última edad del hielo, cuando toda una serie de grandes carnívoros muy especializados se extinguieron. Los guepardos experimentaron entonces lo que se denomina un cuello de botella, que recortó su variabilidad debido a los efectos combinados de la deriva genética y la selección natural, seguido todo ello de una endogamia intensa durante su historia reciente.

En nuestro caso, la ausencia de variabilidad genética se traduce en un alto nivel de asimetría craneana fluctuante. Quizá las poblaciones que habitaban el sureste de la península Ibérica durante el Pleistoceno inferior estuviesen sometidas a los efectos de una endogamia prolongada. De hecho, el registro fósil de esta especie se circunscribe en España a la cuenca de Guadix-Baza; en tales condiciones de endemicidad, el aislamiento genético respecto a otras poblaciones europeas podría ser el factor que explicase la aparición de este individuo peculiar e, incluso, justificase la extinción de esta especie en el margen occidental de Eurasia.

Las patologías detectadas en este individuo indican que tuvo que hacer frente a dificultades severas durante su desarrollo, como las motivadas por la ausencia del canino, que representaría un serio impedimento para la caza. Pese a ello, las condiciones en las que transcurrió su vida le permitieron sobrevivir hasta la edad adulta, probablemente debido al apoyo de los restantes miembros de la jauría. Tal circunstancia indica que el comportamiento altruista de los perros salvajes africanos se encontraba ya plenamente evolucionado en *C. falconeri*, su especie ancestral.

PAUL PALMQVIST
Depto. de Geología de la Universidad de Málaga
ALFONSO ARRIBAS
Museo Geominero de Madrid
BIENVENIDO MARTÍNEZ NAVARRO
Venta Micena, Orce (Granada)

DE CERCA

Texto y fotos: Josep-Maria Gili y Sergi Rossi

Una relación singular

Encontrar un espacio donde asentarse y desarrollarse es el principal problema que tienen que resolver los organismos marinos sésiles. Unos se instalan sobre sustratos estables, como las paredes rocosas; allí compiten con los vecinos por la parcela ocupada. Otros han aprendido a colonizar sustratos inestables, en renovación continua; así se ahorran el gasto que significa la lucha por un sitio.

La colonización de la superficie foliar de las plantas por briozoos e hidrozoos constituye un ejemplo excelente de adaptación; tienen que acomodarse a un medio que no cesa de cambiar. Nota distintiva del paisaje submarino mediterráneo son las praderas de posidonias (*Posidonia oceanica*).

Algunos hidrozoos, pensemos en *Sertularia perpusilla* o en *Plumularia obliqua posidoniae*, han desarrollado una estrategia para vivir sobre las hojas de *P. oceanica*. Las hojas de esta planta crecen desde la base hacia arriba, a un velocidad media de 1 mm diario durante la primavera; las colonias de hidrozoos siguen un sentido opuesto de crecimiento, de arriba abajo y a una velocidad similar. Adheridos a la superficie de las hojas, los estolones reconocen la naturaleza de la epidermis vegetal y nunca se equivocan en la dirección de su expansión.

Una consecuencia de esta estrategia es el abandono de la reproducción sexual. Sólo se multiplican mediante estolones, que, de forma habitual, se prolongan hacia hojas del mismo haz o entre haces de la misma planta. Una vez instalados sobre una nueva hoja, se rompen y generan otra colonia con desarrollo descendente, según lo dicho. Otros estolones se desprenden en forma de propágulos. Las corrientes los arrastran hasta otras hojas de la misma pradera.

Las colonias de hidrozoos duplican su biomasa en una semana, más o menos la tasa que podemos atribuir a un alga. Quizá fuera esa otra razón por la que hasta el siglo pasado se creía que pertenecían al reino vegetal.



Visión panorámica de una pradera de Posidonia oceanica



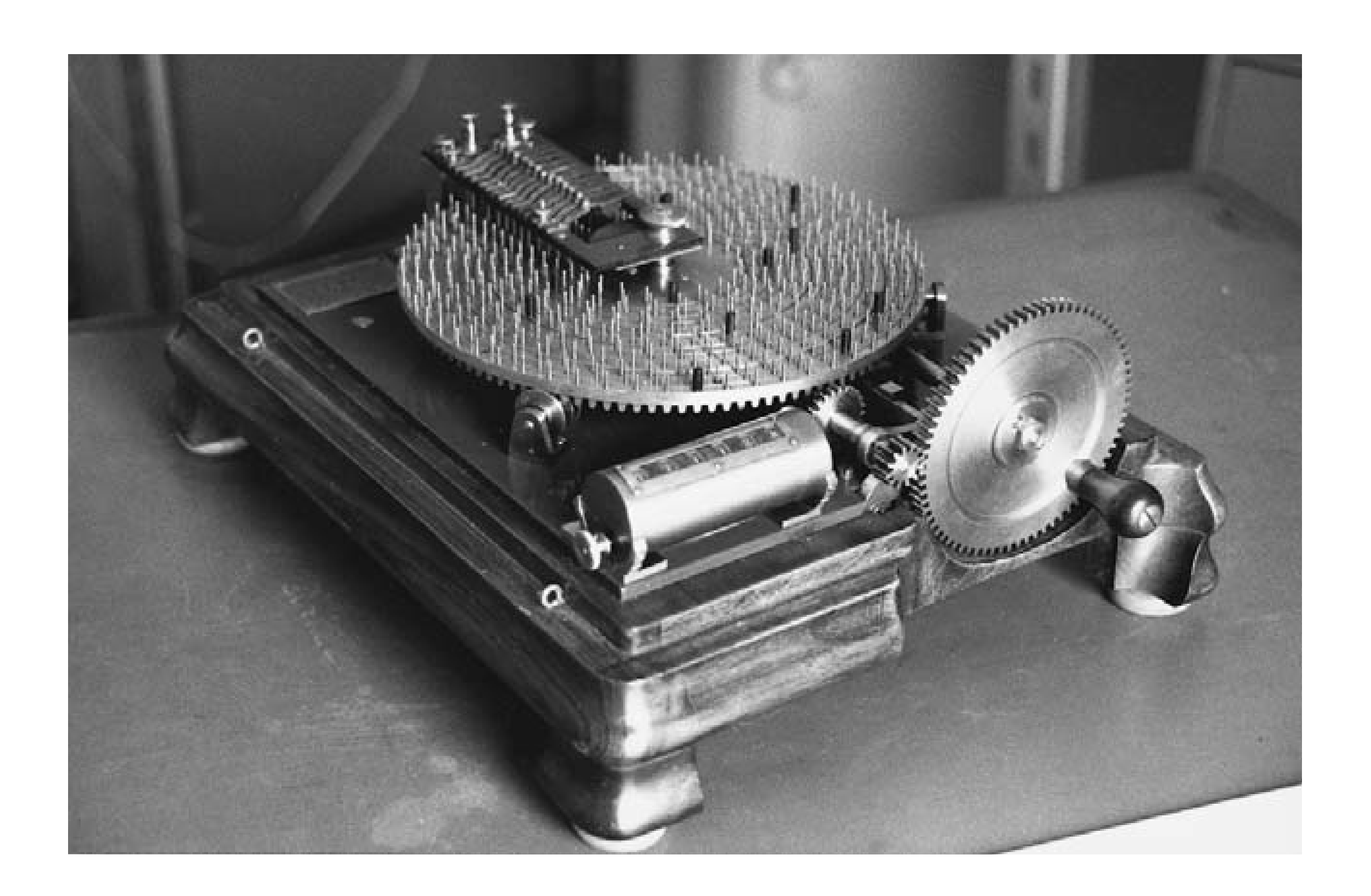
Hojas de Posidonia *colonizadas por* Sertularia perpusilla *con estolones propagulares (en la base foliar) que conectan las hojas*



Colonia de Plumularia obliqua *creciendo en ambos lados de una hoja de* Posidonia



Hojas de Posidonia *densamente colonizadas con fauna sésil y móvil (moluscos)*



Factorización de números grandes

La seguridad de las codificaciones de datos se basa en la dificultad extrema que reviste la descomposición en factores primos de números con más de cien cifras

Johannes Buchmann

El número 114.381.625.757.888.867.669.235.779.976.146.612.010.218.296.721.242.362.562.561.842.935.706.935.245.733.897.830.597.123.563.958.705.058.989.075.147.599.290.026.879.543.541 tiene 129 cifras. Además, es el producto de dos números primos, es decir, números naturales divisibles sólo por sí mismos y por 1. ¿A qué primos corresponden ese par de factores?

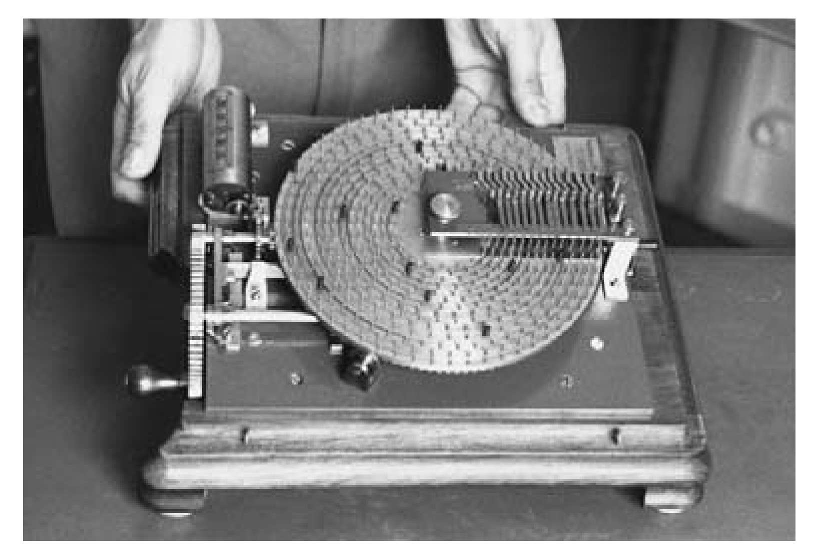
Martin Gardner planteó esa misma cuestión a los lectores de *Investigación y Ciencia* en octubre de 1977, en su celebrada sección de "Juegos matemáticos". A diferencia de los rompecabezas que Gardner solía proponer, éste permaneció largo tiempo sin resolver. En abril de 1994, Paul Leyland, Michael Graff y Derek Atkins presentaron los factores. Durante el otoño del año anterior habían repartido la tarea, vía Internet, entre unos 600 voluntarios, quienes pusieron sus ordenadores a machacar números varias noches seguidas. Se seguía el programa ideado por Arjen K. Lenstra.

No encierra mayor dificultad el multiplicar dos números, aunque consten de 65 cifras. Tómese lápiz y papel, armémonos de disciplina y paciencia y, en una hora, tarea hecha. Si recurrimos a la calculadora del ordenador, la orden es una bagatela. Pero el proceso inverso, la obtención de los factores a partir del producto, eso ya es harina de otro costal. De su dificultad no se libran los ordenadores más veloces.

Las operaciones matemáticas con tanta asimetría —en un sentido muy fáciles, en el otro muy difíciles— son auténticas ratoneras, puertas que franquean la entrada pero no la salida. Merced a esa característica, tales operaciones constituyen la base de los sistemas de criptografía. El proceso codificador debe ser rápido; casi imposible, la descodificación.

En 1978 Ronald Rivest, Adi Shamir y Leonard Adlermann desarrollaron, sobre la base de la factorización, el método RSA, que toma el nombre de sus iniciales.

Para transmitir un mensaje cifrado en RSA, hemos de elegir dos números





1. EN LA “MACHINE A CONGRUENCES” de Eugène Olivier Carissan (1880-1925), una manivela inducía el giro, mediante ruedas dentadas, de un mecanismo contador (*izquierda*) y de 14 anillos giratorios independientes. En la imagen de la derecha se han retirado los cuatro anillos exteriores para mostrar el mecanismo. A cada anillo se le ha adjudicado un número; de dentro afuera: 19, 21, 23, 26, 29, 31, 34, 37, 41, 43, 47, 55 y 59. Cada anillo porta en su parte superior un número de puntas indicativo de su valor. Para encontrar si un número es divisible por cualquiera de los números de los anillos, se coloca una capucha a una punta de cada anillo. Si una de estas capuchas va a parar debajo del listón interruptor dispuesto por encima de los anillos (*centro*), se cierra un contacto eléctrico. Cuando esto ocurre para todos los anillos a la vez, suena una señal. Si disponemos las capuchas de otro modo, podemos encontrar números que cumplan condiciones de congruencia arbitrarias en el módulo de los números de los anillos. La máquina permite seleccionar los números correctos para la criba cuadrada. Carissan demostró, con sólo diez minutos de manivela, que el número 708.158.997 era primo. Expuso que se podía descomponer, de modo único, en la suma de dos cuadrados: $19.224^2 + 18.401^2$.

primos, p y q, calcular su producto, $n = p \times q$, y mostrar el resultado del producto, n, manteniendo secretos los factores, p y q. Para encriptar, sólo se necesita saber el valor del producto, n. La descodificación, por contra, le está reservada en exclusiva a quienes conozcan los primos p y q. Si estos factores tienen más de 150 cifras, tardaríamos dos milenios en descerrajar n, incluso valiéndonos de los mejores programas de cómputo. Resulta, pues, harto fácil fabricar problemas de factorización; y, si los factores primos son suficientemente grandes, no habrá forma de resolver los problemas en un tiempo razonable.

La historia de la factorización esconde un pasado venerable. Ya en la antigüedad los matemáticos demostraron que todo número natural podía descomponerse en producto de números primos, únicos salvo en el orden; por ejemplo, $12 = 2 \times 2 \times 3$. Para ahondar en las propiedades de los números naturales se hizo indispensable contar con métodos de descomposición en primos.

En este campo se ha avanzado bastante desde el advenimiento de los ordenadores. De eso tratará el artículo. Intentaré explicar la operación y rendimiento de los algoritmos modernos de factorización.

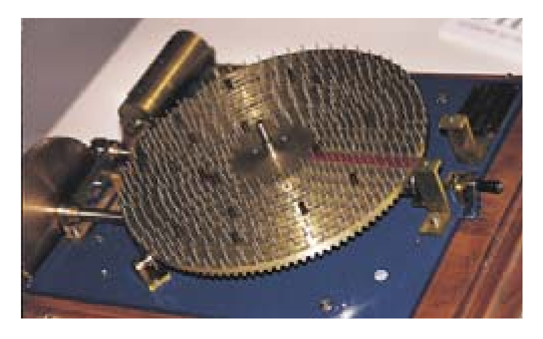
Pierre de Fermat (1601-1665), cuyo famoso teorema se demostró no hace mucho, creyó haber encontrado una receta para determinar números primos de tamaña arbitrario. Para un número natural i calculamos $F_i = 2^{2^i} + 1$. En la actualidad, los números F_i se denominan números de Fermat. Los primeros son $F_0 = 2^{2^0} + 1 = 3$, $F_1 = 2^{2^1} + 1 = 5$, $F_2 = 2^{2^2} + 1 = 17$, $F_3 = 257$, $F_4 = 65.537$. Inmediatamente reconocemos que los primeros tres números de Fermat (3, 5 y 17) son primos. Lo mismo ocurre con F_3 y F_4.

Pero no todos los F_i son primos. Leonhard Euler (1707-1783) descubrió en el año 1732 las igualdades $F_5 = 4.294.967.297 = 641 \times 670.041$, que demuestra que ese número de Fermat es compuesto. Pasaron 150 años hasta que, en 1880, Landry y Le Lasseur comprobaron que $F_6 = 18.446.744.073.709.551.617$ es el producto de los números primos 274.177 y 67.280.421.310.721. Michael A. Morrison y John D. Brillhart determinaron en 1970 los dos factores primos de F_7. Richard Brent y John M. Pollard descompusieron en 1980 el número F_8. En 1990, Arjen K. Lenstra, Hendrik W. Lenstra, Mark S. Manasse y Pollard hallaron los factores primos de F_9.

Estos datos ponen de relieve la dificultad ínsita en el problema de la factorización. Hasta 1970 no se pudo descomponer el número F_7 de Fermat, de 39 cifras. Pero también refleja el enorme desarrollo de los últimos tiempos; apenas 20 años más tarde, se factorizaba también el número F_9, de 155 cifras.

Mucho antes de que se conociesen los factores, se sabía ya que F_7, F_8 y F_9 no eran primos. Hay un test para determinar si un número es o no compuesto sin calcular sus factores. Sólo se aborda la onerosa descomposición, una vez confirmado que el esfuerzo vale la pena.

¿Cómo averiguar prestamente si $n = 58.483$, por decir un número, es primo? Podemos acudir al test de Fermat. En su versión más simple, éste comprueba si n es un divisor de $2^{n-1} - 1$. Fermat demostró que esta propiedad se cumplía en todos los primos impares (es decir, todos menos el 2); por ejemplo, 3 es divisor de $2^{3-1} - 1 = 3$. Por tanto, si n no es divisor de $2^{n-1} - 1$, entonces n no puede ser un número primo. Por este método, ciertamente, no llegamos a conocer mejor los factores primo0s. A modo de botón de muestra: para $n = 6$ se obtiene $2^5 - 1 = 31$. Puesto que 6 no es divisor de 31, podemos concluir que 6 no es un número primo. Pero nada más.





2. TODOS LOS ANILLOS de la “machine à congruences” tienen una posición cero (*izquierda*). Los anillos giran a lo largo de la rueda dentada común y sobre unos discos cuyos ejes forman un ángulo de 120 grados con el eje de la rueda dentada (*derecha*). Tan sólo una punta con capucha mueve el contacto en el listón interruptor.

A esa conclusión podría haberse llegado sin el test de Fermat. Tomemos un ejemplo algo más difícil. Para aplicar el test al número 58.483, hemos de calcular el valor de $2^{58.482} - 1$ y comprobar si el resultado es divisible entre 58.483. Si abordásemos esa cuestión a la brava, nos eternizaríamos en la tarea, pues el número $2^{58.482} - 1$ presenta 17.604 cifras. Lo inteligente es calcular congruencias mediante un algoritmo ingenioso y rápido.

Debe comprobarse si 58.483 es un divisor de $2^{58.482} - 1$, es decir, si al dividir $2^{58.482}$ entre 58.483 obtenemos por resto 1. Este resto lo calculamos mediante una exponenciación binaria. De entrada, representamos el exponente en forma binaria:

$$58.482 = 2^{15} + 2^{14} + 2^{13} + 2^{10} + 2^{6} + 2^{5} + 2^{4} + 2.$$

Lo que nos da la igualdad

$$2^{58.482} = 2^{2} \times 2^{2^4} \times 2^{2^5} \times 2^{2^6} \times 2^{2^{10}} \times 2^{2^{13}} \times 2^{2^{14}} \times 2^{2^{15}}.$$

A continuación, calculamos por orden los restos de 2^2, 2^4, 2^8, etcétera, al dividir entre 58.483. Con este fin, elevamos al cuadrado el resto precedente y dividimos el resultado entre 58.483. Ahora ya sólo falta multiplicar las potencias que aparecen en la descomposición binaria del exponente y reducirlas después de cada operación; es decir, determinar el resto respecto a la división entre 58.483. De este modo, todos los resultados intermedios muestran un tamaño aceptables. Se obtiene $2^{58.482} \equiv 4 \times 7053 \times 34.259 \times 42.237 \times 34.763 \times 53.664 \times 5010 \times 10.893 \equiv 11.669 \mod 58.483$. Por tanto, el número 58.483 no puede ser primo; si lo fuera el resultado hubiese sido 1. El método, aunque bastante rápido, no proporciona tampoco los factores primos de la descomposición de 58.483.

Tratemos ahora de descomponer n en un producto de dos divisores propios, divisores que no sean ni 1 ni n (los números 1 y n constituyen los divisores impropios de n). Así, por ejemplo, 3 es un divisor propio de 12. Comencemos por analizar si los divisores son números primos. Que no lo son, se descompone de nuevo, y así hasta que todos los factores hallados sean primos. En nuestro ejemplo, $12 = 3 \times 4$. El 3 es un número primo; pero no el 4, que es compuesto. Proseguimos, $4 = 2 \times 2$. Hemos arribado a la descomposición completa de nuestro caso: $12 = 2 \times 2 \times 3$. El secreto de un algoritmo de factorización consiste en hallar un divisor propio de un número compuesto.

Para ello se recurre al método de la división a prueba. Dividimos n sucesivamente entre todos los números primos 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, ..., hasta alcanzar la división exacta, sin resto. En una tabla del ordenador habremos guardado antes los números primos. En el caso de $n = 58.483$, se comprueba que el quincuagésimo primer número primo, el 233, es un divisor de n (el otro divisor es 251). Para dar con este divisor, se requiere, pues, efectuar 51 divisiones con resto, un peaje todavía razonable. Pero cuanto mayor sea p, el factor primo más pequeño de n, habrá que realizar más divisiones y mayor tendrá que ser la tabla de números primos con la que se trabaje. Así pues, la división a prueba constituye un buen método cuando interese determinar factores pequeños; para factores grandes se necesitan otros métodos.

Por ejemplo, el método de las curvas elípticas, descubierto por Hendrik W. Lenstra en 1985. De las curvas elípticas, objetos matemáticos muy interesantes y útiles, se sirvió Andrew Wiles para su demostración del teorema de Fermat. Se emplean en codificación de datos y para factorizaciones.

De forma análoga al test de Fermat, en el método de curvas elípticas (MCE) se realiza una operación que sólo da resultado si n es primo. Cuando n es compuesto —dato que conocemos gracias a un test de Fermat hecho de antemano— la operación fallará. ¿Qué significa eso? A lo largo de

i	0	1	2	3	4	5	6	7
$R(2^{2^i}, 58.483)$	2	4	16	256	7053	34.259	42.237	57.220
i	8	9	10	11	12	13	14	15
$R(2^{2^i}, 58.483)$	16.128	38.483	34.763	31.940	44.631	53.664	5010	10.893

3. LOS RESTOS de 2^{2^i} en la división entre 58.483, para valores de i de cero a 15. Para hallar éstos no es necesario calcular el valor de los números 2^{2^i} (que pueden llegar a ser muy grandes). Basta con conocer los restos para los valores de la tabla calculados con anterioridad.

S	10^3	10^6	10^9	10^{12}	10^{15}	10^{18}
Números primos $\leq S$	167	78497	$4{,}8 \times 10^7$	$3{,}6 \times 10^{10}$	$2{,}8 \times 10^{13}$	$2{,}4 \times 10^{16}$

4. NUMEROS PRIMOS MENORES que 10^3, 10^6, etcétera. Para hallar un factor primo de este tamaño, habría que efectuar la misma cantidad de divisiones a prueba.

Nº de cifras	Tiempo de cómputo
6	6 segundos
9	20 segundos
12	2,5 minutos
15	16 minutos
18	85 minutos
21	7,2 horas
24	33,6 horas
27	140 horas
30	574 horas

5. TIEMPO DE COMPUTO necesario para factorizar un número mediante el método de curvas elípticas en una estación de trabajo del tipo Sun SPARC-station ELC. A la izquierda se indica el número de cifras y a la derecha el tiempo medio requerido.

la operación tenemos que calcular reiteradas veces el máximo común divisor (mcd) de *n* con otros números. El cómputo sólo puede proseguir si el mcd es igual a 1, es decir, si los dos números son primos entre sí. De no ser así, se habrá encontrado un divisor de *n* y, con suerte, un divisor propio. Con ello habremos alcanzado la meta.

El azar interviene en este método. Existen muchísimas curvas elípticas entre las que elegir y con las que se pueden realizar los cálculos. Se escoge una aleatoriamente. Si no nos proporciona ningún divisor propio, lo probamos con la siguiente. Lenstra demostró que para todo *n* compuesto existen curvas que proporcionan un divisor.

Al igual que en la división a prueba, el tiempo necesario para encontrar un factor con el método de las curvas elípticas depende del tamaño del factor en cuestión. Los factores inferiores a 30 cifras pueden determinarse en un tiempo razonable.

Pero, ¿qué es una curva elíptica? De momento podemos decir que se trata realmente de una curva, es decir, de un conjunto de puntos del plano (x, y), cuyas coordenadas cumplen cierta ecuación. En el caso de las curvas elípticas, esta ecuación es $y^2 = x^3 + ax + b$; además, los parámetros *a* y *b* tienen que ser números enteros elegidos de suerte que no se cumpla la ecuación $4a^3 + 27b^2 = 0$. Pese a su nombre, las curvas elípticas no son elipses. Puede hablarse también de curvas cuando el conjunto de puntos está formado por varias ramas no conexas.

En las curvas elípticas, y ello reviste particular interés, podemos definir una suma interna, en sentido abstracto: para cualquier par de puntos de la curva P_1 y P_2 se puede determinar, mediante una construcción geométrica, un tercer punto, también de la curva, denominado $P_1 + P_2$. La suma así definida cumple las reglas de la adición: es asociativa y conmutativa, tiene elemento neutro (elemento que sumado a cualquier punto no lo altera) y elemento inverso (para cada punto existe otro negativo, y de la suma de ambos puntos resulta el elemento neutro). Por consiguiente, una curva elíptica es un grupo conmutativo con respecto a la adición.

El elemento inverso, $-P$, de un punto P de la curva es su punto simétrico con respecto al eje de las abscisas. Para determinar la suma $P_1 + P_2$ de los puntos P_1 y P_2 hay que trazar una recta por los puntos P_1 y P_2. Esta recta corta a la curva en un tercer punto Q. El punto simétrico a Q con respecto al eje de las abscisas, es decir, $-Q$, es la suma $P_1 + P_2$ buscada.

En el caso particular $P_1 = P_2$, en vez de la recta por P_1 y P_2 aparece la tangente de la curva en el punto $P_1 = P_2$. Si se cumple $P_1 = -P_2$, la recta que pasa por P_1 y P_2 no corta ningún otro punto de la curva. Como alternativa, nos imaginamos que la recta corta a la curva en el infinito. Por ello, a los puntos de la curva le añadimos uno adicional, que imaginamos en el infinito. A este punto se le designa por $\mathcal{O}$ y se fija $P_1 - P_1 = \mathcal{O}$. El punto $\mathcal{O}$ es, por tanto, el elemento neutro del grupo aditivo.

La definición geométrica de la adición de puntos se puede transcribir en forma de ecuaciones. Si $P_1 = (x_1, y_1)$ y $P_2 = (x_2, y_2)$ son puntos de la curva elíptica, entonces se cumple:

Congruencias y cálculo del máximo común divisor

La división de un número entero por un número natural puede ser exacta o generar un resto. Por ejemplo, $7 : 3 = 2$ resto 1, es decir, $7 = 2 \times 3 + 1$. Si se trabaja con números negativos, es necesario prestar más atención. Así, se cumple $(-7) : 3 = -3$ resto 2, puesto que $3 \times (-3) + 2 = -7$. Por tanto, si dividimos *a* por *n* obtendremos, como resto, uno de los números 0, 1, 2, ..., $n - 1$. Formalizaremos el resto con la expresión $R(a, n)$.

Para determinar el máximo común divisor (mcd) de dos números naturales a_1 y a_2 se emplea el algoritmo de Euclides. Se calculan sucesivamente $a_3 = R(a_1, a^2)$, $a_4 = R(a_2, a_3)$, etc., hasta obtener un resto cero. El mcd de a_1 y a_2 es el último resto de división distinto de cero.

En aplicación de ese método, el mcd de $a_1 = 631$ y $a_2 = 405$ se calcula así:

631:405 = 1 resto 226
405:226 = 1 resto 179
226:179 = 1 resto 47
179: 47 = 3 resto 38
47: 38 = 1 resto 9
38: 9 = 4 resto 2
9: 4 = 2 resto 1
4: 2 = 2 resto 0

El último resto no nulo es 1. Por tanto, el resultado buscado será $\text{mcd}(405, 631) = 1$; estos dos números son primos entre sí.

Si dos números enteros, *a* y *b*, dan el mismo resto al dividirlos entre un número natural *n*, de ellos se dice que son congruentes módulo *n*; formalizado: $a \equiv b \mod n$. Se cumple que $10 \equiv 4 \mod 3$, pues lo mismo 10 que 4 divididos por 3 dan resto 1. Es decir, $a \equiv b \mod n$ se cumple si y sólo si *n* es un divisor de $b - a$; por ejemplo, $10 - 4 = 6$ es divisible por 3.

Si se calculan los restos de divisiones de expresiones complicadas, en las que se suma, se resta o se multiplica, se pueden substituir los resultados provisionales por sus restos de división. Si deseamos hallar el resto de $14 \times (12 + 7)^8$ al dividir entre 8, entonces calculamos primero $14 \times (12 + 7)^8 \equiv 6 \times (4 + 7)^8 \mod 8$; es decir, se substituye 14 por 6 (el resto de 14 dividido entre 8), y correspondientemente 12 por 4. Análogamente se obtiene $6 \times (4 + 7)^8 \equiv 6 \times 3^8 \equiv 6 \times (3^2)^4 \equiv 6 \times 1^4 \equiv 6 \mod 8$. También se habría podido calcular $14 \times (12 + 7)^8 = 237.769.882.574$ y dividir el resultado por 8. Pero con el primer método los resultados intermedios nunca son mayores que 7; el cómputo, por ende, procede más raudo.

$$-P_1 = (x_1, -y_1),$$

$$P_1 + P_2 = \begin{cases} \mathcal{O}, & \text{si } P_1 = -P_2 \\ P_2, & \text{si } P_1 = \mathcal{O} \\ P_1, & \text{si } P_2 = \mathcal{O}. \end{cases}$$

En los demás casos se calcula

$$\lambda = \begin{cases} \dfrac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}, & \text{si } P_1 \neq P_2 \\ \dfrac{3x_1^2 + a}{2y_1}, & \text{si } P_1 = P_2. \end{cases}$$

$$x_3 = -x_1 - x_1 + \lambda^2$$

$$y_3 = -y_1 + \lambda(x_1 - x_3)$$

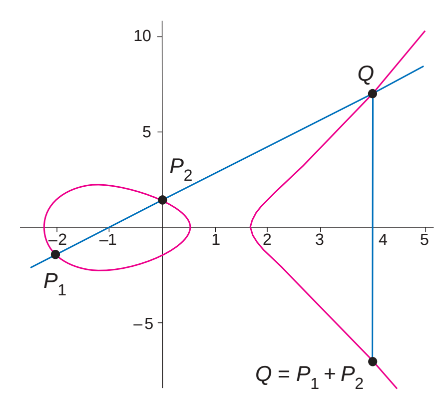
$$P_1 + P_2 = (x_3, y_3)$$

Estas ecuaciones adquieren cierta independencia. Las podemos emplear sin tener que suponer que x e y son coordenadas de puntos en el plano. Tampoco resulta obligado que las componentes de las ecuaciones sean números reales; basta con que sirvan para sumar, restar, multiplicar y dividir.

Al hacer cálculos con congruencias, con los restos de divisiones se pueden realizar sumas, restas y multiplicaciones. Los restos que se obtienen al dividir un número entero entre un número natural n pueden adoptar los valores 0, 1, 2, ..., $n-1$. Con estos restos realizamos las operaciones habituales, salvo que, si el resultado del cálculo excede el dominio del 0 a $n-1$, entonces se divide entre n y se toma el resto. Sea, por ejemplo, $n = 12$; en este caso, $10 + 5 = 3$ y $1 - 2 = 11$, como comprobamos en las medidas horarias: cinco horas después de las diez son las tres, y dos horas antes de la una son las once. Abundando en lo mismo, $4 \times 5 = 8$.

La división requiere más atención. Dividir es lo mismo que multiplicar con el inverso; el valor inverso de x es el elemento y que cumple la ecuación $xy = 1$. Para $n = 12$, por ejemplo, el inverso de 5 es 5, puesto que $5 \times 5 = 25 \equiv 1 \mod 12$. Pero el inverso de 4 no existe, dado que $4y$ siempre es 4, 8 o 0 mod 12. En particular, se tiene $4 \times 3 = 0$. Sólo podemos dividir ilimitadamente si n es primo. Determinaremos el inverso con una modificación del algoritmo de Euclides.

Ahora podemos definir —de manera abstracta e igual que con los números reales— otra curva elíptica correspondiente al conjunto de los restos, con las operaciones básicas adaptadas. El caso más sencillo aparece cuando el módulo n, es decir, el número respecto



6. CURVA ELIPTICA correspondiente a los parámetros $a = -4$ y $b = 1$. Los puntos $P_1 = (0, 1)$ y $P_2 = (-1, -2)$ pertenecen a la curva, puesto que cumplen la ecuación $y^2 = x^3 + ax + b$.

al cual se calculan los restos, es un número primo, p. Los parámetros a y b de la curva han de ser números enteros entre 0 y $p-1$ que cumplen la condición $4a^3 + 27b^2 \not\equiv 0 \mod p$. La nueva "curva", que ha dejado de presentar cualquier connotación con ninguna línea, consta de los pares (x, y) de números enteros entre 0 y $p-1$ que cumplen la congruencia $y^2 \equiv x^3 + ax + b \mod p$; contiene, además, el punto $\mathcal{O}$. Las ecuaciones de la adición quedan inalteradas, con la salvedad de que los números resultantes se sustituyen por sus restos módulo p.

Pongamos un ejemplo: para $p = 5$, $a = 1$ y $b = -1$ ($\equiv 4 \mod 5$) los puntos $P_1 = (1, 1)$ y $P_2 = (2, 2)$ son puntos de la curva elíptica. Para calcular los puntos $P_3 = P_1 + P_2$, se divide entre $2y_1 = 4$. El inverso de 4 es 4, puesto que $4 \times 4 = 16 \equiv 1 \mod 5$. Por tanto, $x_3 = R(-1 - 2 + 1, 5) = 3$ e $y_3 = R(-1 + 1 - 3, 5) = 2$. De hecho, el punto $(3, 2)$ pertenece a la curva.

De nuevo se cumple que el conjunto $E(p)$ de los puntos de la curva elíptica módulo p forma un grupo conmutativo. Pero tiene un número finito de elementos, comprendidos entre $p - 2\sqrt{p} + 1$ y $p + 2\sqrt{p} + 1$. Al probar todos los pares de números posibles, resulta que para $p = 5$ la curva elíptica $E(5)$ mencionada está compuesta por los elementos $(3, 3)$, $(3, 2)$, $(0, 3)$, $(0, 2)$, $(1, 4)$, $(1, 1)$, $(2, 3)$, $(2, 2)$ y $\mathcal{O}$. Consta, pues, de nueve elementos.

El método de las curvas elípticas se basa en un teorema de Joseph Louis Lagrange (1736-1813). Si un elemento de un grupo finito se suma consigo mismo tantas veces cuantos elementos tenga el grupo, entonces el resultado es necesariamente el elemento neutro. En nuestro caso, si sumamos nueve veces un elemento de $E(5)$ llegamos siempre al mismo resultado: $\mathcal{O}$. (La notación es la habitual: $2P$ para $P + P$, $3P$ para $P + P + P$, etcétera.)

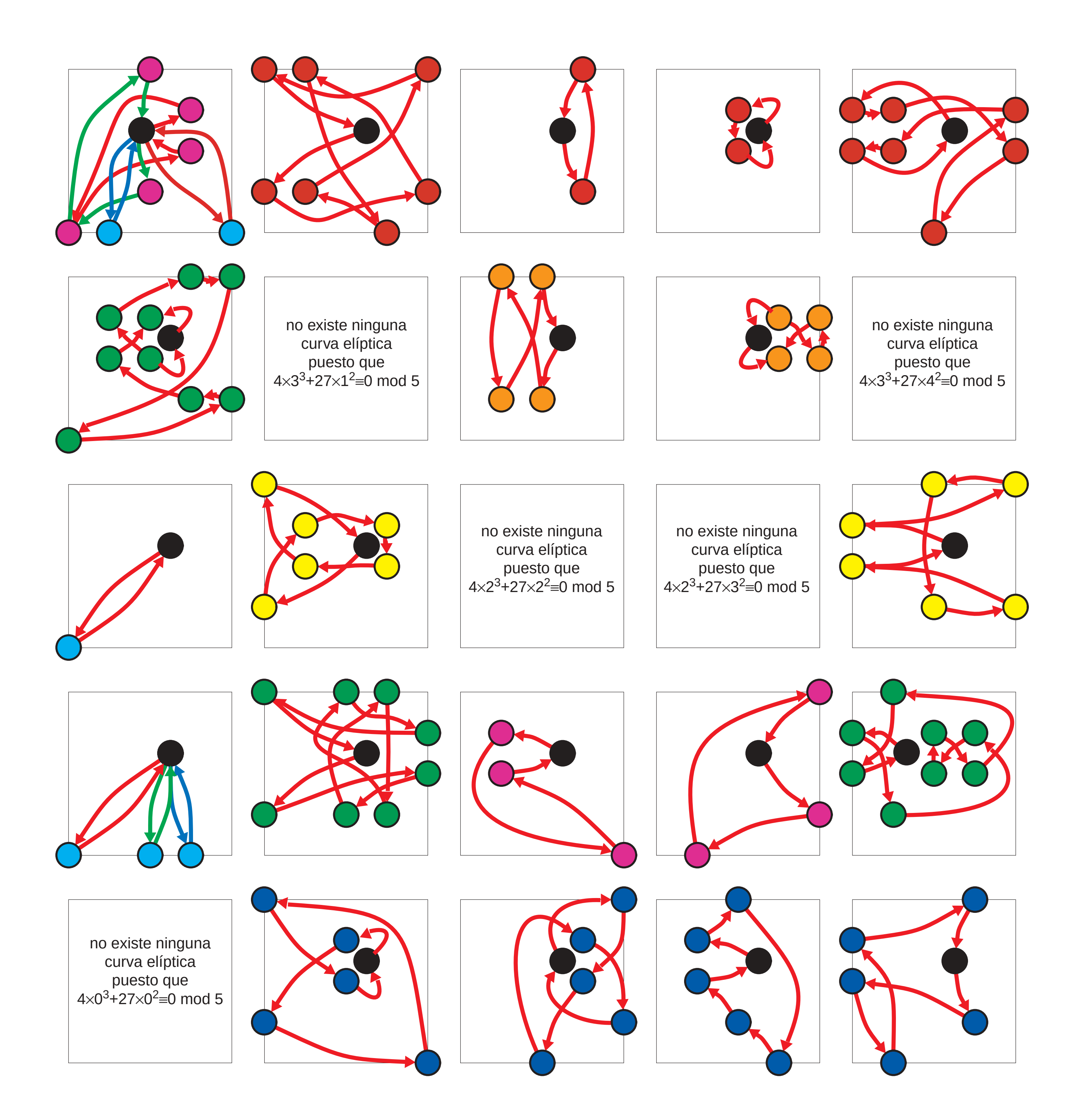
Hagamos el cálculo para $P = (1, 1)$. En módulo 5 se tiene $2P = (2, 2)$, $4P = 2 \times (2P) = (0, 2)$, $8P = 2 \times (4P) = (1, -1)$ y, por último, $9P = 8P + P = (1, -1) + (1, 1) = \mathcal{O}$. De donde se infiere que no es necesario sumar nueve veces P. Antes bien, se recurre al truco empleado en la potenciación binaria: se calcula sucesivamente $2P$, $4P$, ..., 2^mP y luego, para el resultado final, se suman las potencias de dos necesarias. Procediendo así, se acorta el número de operaciones, razón poderosa cuando, en vez de nueve, se trabaja con números muy grandes.

¿Cómo aplicar las curvas elípticas para determinar los divisores de números compuestos? Sea el caso $n = 35$. De entrada, elegimos una curva elíptica módulo n; o sea, dos números enteros a y b que cumplan $4a^3 + 27b^2 \not\equiv 0 \mod n$. Tomamos un punto de esta curva, es decir, una solución $P = (x, y)$ de la congruencia $y^2 \equiv x^3 + ax + b \mod n$. Para $n = 35$ escogemos nuevamente $a = 1$, $b = -1$, $x = 1$ e $y = 1$. Estos valores generan una curva elíptica cuyos puntos no se pueden sumar siempre. A tenor de las ecuaciones, falta determinar un inverso módulo n, que a lo mejor no existe, puesto que n es un número compuesto. Pese a todo, debe buscarse; el fracaso que de ello quizá se derive nos aporta, paradójicamente, la información que precisamos.

Escogemos un número natural k. Establecemos $k = 9$. Entonces, siguiendo el método antes descrito para $E(5)$, intentamos sumar el punto P nueve veces consigo mismo. Calculamos nueve veces $P = (1, 1)$ módulo 35. Se obtiene $2P = (2, 2)$, $4P = (0, 22)$, $8P = (16, 19)$. Si ahora deseamos calcular $9P = 8P + P = (16, -16) + (1, 1)$, tenemos que determinar primero λ, y, para ello, dividir entre $16 - 1 = 15$ mod 35. Pero no se puede: no existe el inverso de 15 mod 35, puesto que el máximo común divisor de 15 y 35 es 5 y no 1. Mas, al proponernos determinar el inverso hemos dado, mediante el algoritmo de Euclides, con el divisor propio de 35, que era lo que buscábamos.

El cálculo fracasó para $k = 9$ por ser 5 un divisor de n y 9 la cantidad de elementos de esta curva de $E(5)$. Esto se debe al teorema de Lagrange, como también que el cálculo fracase para todo múltiplo de 9.

Si queremos hallar una descomposición en números primos de seis



7. REPRESENTACION DE LAS CURVAS ELIPTICAS *E*(*p*) para *p* = 5. Cada casilla corresponde a un par de parámetros (*a*, *b*). Por convención de coordenadas, *a* transcurre de izquierda a derecha y *b*, de abajo arriba; ambos ejes, de 0 a 4. Dentro de cada casilla, se representan los elementos del grupo en sus coordenadas correspondientes, que también varían de 0 a 4, mediante círculos de color. Además aparece el elemento neutro $\mathcal{O}$ (*círculo negro*) en el lugar apropiado de la parte central de la casilla. Por ejemplo, el grupo correspondiente a *a* = 1 y *b* = 0 está situado en segundo lugar, desde la izquierda de la última fila, y contiene los elementos (0, 1), (0, 4), (2, 2), (2, 3), (4, 0) y $\mathcal{O}$. En cada grupo la flecha roja señala, partiendo de $\mathcal{O}$, otro elemento de *x*. Los múltiplos de éste (es decir, *x*, *x* + *x*, *x* + *x* + *x*, etcétera) están unidos por una cadena de flechas rojas que termina otra vez en $\mathcal{O}$: forman un ciclo. Los grupos que tienen más de un ciclo se distinguen mediante flechas de diferentes colores. El color de la flecha corresponde al número de elementos del ciclo que señala. Hasta en este ejemplo elemental se pone de manifiesto la eficacia del método de las curvas elípticas: dado un par arbitrario de puntos (*a*, *b*), es muy pequeña la probabilidad de que no se pueda emplear (porque no existe ninguna curva elíptica) o de que sea improductivo (porque ya se ha descubierto un grupo de estructura igual).

Número de cifras	6	9	12	15	18	21	24	27	30
B	147	682	2462	8318	23462	63502	162730	395808	945922
Número de curvas	10	24	55	111	231	445	833	1501	2594

8. EL METODO DE LAS CURVAS ELIPTICAS halla divisores de un número *n* sin apenas importar el tamaño de *n*. El tiempo invertido aumenta con el tamaño del divisor buscado. La primera fila recoge las cifras; la segunda, el número *B*, que sirve para fijar *k*, y la última, la cantidad de curvas a ensayar.

cifras, fijaremos el número k de suerte que sea múltiplo de tantos números de seis cifras como sea posible. Procuraremos que estos números de seis cifras no tengan factores primos altos. Si lo logramos, habrá muchas posibilidades de que k sea múltiplo del número de elementos (que desconocemos) de $E(p)$. Al multiplicar k veces un elemento de $E(n)$ estamos también comprobando la divisibilidad de n por todos estos números primos.

Para encontrar un número k adecuado fijamos un número B y calculamos k como producto de todas las potencias de números primos no mayores que B. Si buscamos factores con un máximo de seis cifras, entonces fijamos $B = 147$. De ello obtenemos $k = 2^7 \times 3^4 \times 5^3 \times 7^2 \times 11^2 \times 13 \times 17 \times 19 \times ... \times 139$.

El método de curvas elípticas no suele resultar a la primera. Hay que ir tanteando con varias curvas, es decir, diversos pares de parámetros a y b. Cuanto mayor sea B, con más curvas habrá que ensayar. Si ni siquiera entonces el MCE no ha encontrado aún un divisor, podremos convencernos de que es verosímil que el número n analizado carezca de divisores de dicha magnitud.

El tiempo de cómputo del método de curvas elípticas, que apenas depende del tamaño del número a factorizar, sí es función del tamaño del divisor primo. Si un número de 1000 cifras tiene un divisor de 20 cifras, entonces lo podemos determinar con el método de curvas elípticas. Pero el tiempo de cómputo crece bastante con el tamaño de factor primo más pequeño; por eso MCE resulta idóneo para factores de hasta 30 cifras. El mayor factor primo hasta ahora encontrado con este método tiene 47 cifras y fue descubierto por Peter Montgomery.

Para buscar divisores superiores, se acude a otro procedimiento. Se trata de hallar números naturales X e Y con la propiedad de que n sea un divisor de $X^2 - Y^2$.

Según la tercera fórmula binómica se cumple $X^2 - Y^2 = (X - Y)(X + Y)$. Por tanto, el número n tiene que ser un divisor de $(X - Y)(X + Y)$. Si n no es un divisor de $X - Y$, ni de $X + Y$, existe entonces un divisor propio de n que es divisor de $X - Y$ y otro divisor propio de n que es divisor de $X + Y$. El máximo común divisor de $X - Y$ y n es mayor que 1; uno así precisamente se estaba buscando. Si tomamos $n = 7429$, $X = 227$ e $Y = 210$, resulta entonces $X^2 - Y^2 = 7429$. Por tanto, 7429 es un divisor de $X^2 - Y^2$. Sin embargo, el número 7429 no es divisor de $X - Y = 17$, ni de $X + Y = 437$; por la razón obvia de que es mayor que ambos números. La verdad es que el mcd $(17, 7429) = 17$ es un divisor propio de 7429.

¿Cómo hallar los números X e Y? Se empieza por plantear un sistema de ecuaciones lineales, cuyas soluciones determinan X e Y. El número de ecuaciones depende del tamaño del número que se desea factorizar; para un número de 120 cifras, cuéntese con unas 245.000 ecuaciones para otras tantas incógnitas. A diferencia del método de curvas elípticas, el tiempo de cálculo depende del tamaño del número a factorizar, no del valor del primer factor primo.

Para plantear el sistema de ecuaciones se empieza por calcular una serie de números cuadrados con dos propiedades: ser del mismo orden de magnitud que n y diferir de n en un número, no importa el signo, que sea producto de números primos pequeños. Para $n = 7429$ optaremos por los números cuadrados 83^2, 87^2 y 88^2, pues las diferencias son productos de los menores números primos: 2, 3, 5 y 7:

$$83^2 - 7429 = -540 = (-1) \times 2^2 \times 3^3 \times 5$$
$$87^2 - 7429 = 140 \quad = 2^2 \times 5 \times 7$$
$$88^2 - 7429 = 315 \quad = 3^2 \times 5 \times 7$$

Las filas de esta tabla se denominan relaciones. Para multiplicar unas relaciones por otras, hay que sumar los exponentes de los factores primos comunes. Si la suma de los exponentes de cada factor primo es par, entonces el producto es un cuadrado. Por ejemplo $(87^2 - 7429) \times (88^2 - 7429) = 2^2 \times 3^2 \times 5^2 \times 7^2 = (2 \times 3 \times 5 \times 7)^2 = 210^2$.

Para hallar X e Y sólo falta aplicar las reglas del cálculo de congruencias. Ellas nos avalan las igualdades $(87 \times 88)^2 \equiv (87^2 - 7429) \times (88^2 - 7429)$ mod 7429. Se cumple, por tanto, que $(87 \times 88)^2 \equiv 210^2$ mod 7429. En esta expresión todavía podemos sustituir 87×88 por su resto al dividirlo entre 7429. Así obtenemos $227^2 \equiv 210^2$ mod 7429; es decir, 7429 es un divisor de $227^2 - 210^2$. En consecuencia, podemos establecer $X = 227$ e $Y = 210$, valores que nos garantizan, de acuerdo con lo expuesto, que 17 es divisor de 7429.

Entre las distintas relaciones hay que escoger las que se dejan combinar, en el modo expuesto, para formar un cuadrado. Por ese fin se plantea el sistema de ecuaciones aludido. Para cada relación se da una incógnita, cuyo valor es uno, si emplea la relación para formar el cuadrado, y es cero en caso contrario. Nuestro ejemplo plantea tres incógnitas, λ_1, λ_2 y λ_3; y el producto de todas las relaciones que se emplean puede escribirse en la forma:

$$((-1) \times 2^2 \times 3^3 \times 5)^{\lambda_1} \times (2^2 \times 5 \times 7)^{\lambda_2} \times (3^2 \times 5 \times 7)^{\lambda_3}$$

o bien, transformando con las leyes de potencias:

$$(-1)^{\lambda_1} \times 2^{2\lambda_1 + 2\lambda_2} \times 3^{2\lambda_1 + 2\lambda_3} \times 5^{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \times 7^{\lambda_2 + \lambda_3}.$$

La condición de que este producto sea un cuadrado y, por tanto, pares todos los exponentes, proporciona el sistema de ecuaciones

$$\begin{aligned} \lambda_1 \qquad\qquad &\equiv 0 \bmod 2 \\ \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 &\equiv 0 \bmod 2 \\ \lambda_2 + \lambda_3 &\equiv 0 \bmod 2. \end{aligned}$$

La primera ecuación corresponde al factor –1, la segunda al 5 y la tercera al 7. Los exponentes de los factores

Número de cifras de *n*	50	60	70	80	90	100	110	120
Número de ecuaciones	3000	4000	7400	15.000	30.000	51.000	120.000	245.000

9. CRIBA CUADRADA, herramienta empleada para determinar factores muy grandes de un número *n*. En el transcurso del método es necesario establecer un sistema de ecuaciones cuya magnitud depende del tamaño de *n*.

2 y 3, siempre pares, no necesitan ecuaciones propias.

El sistema de ecuaciones obtenido puede resolverse por métodos habituales, el de eliminación de Gauss, por ejemplo, con la particularidad de que los cálculos se hacen en módulo 2. El método de Gauss sólo emplea las cuatro operaciones básicas; siempre se puede dividir módulo 2, pues 2 es un número primo. De esa manera se obtiene la solución $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = \lambda_3 = 1$, y, con ella, los valores de X e Y.

¿Cómo hallar las relaciones? Mediante el auxilio del método de “criba cuadrada”, al que el algoritmo debe su nombre. De la criba se esperan cuadrados que, al restarles n, proporcionen números que se descompongan sólo en factores primos pequeños.

Ante todo, fijamos qué números primos pueden aparecer en las relaciones. En el ejemplo, estos números son 2, 3, 5 y 7. Para poder trabajar con resultados negativos, añadimos el –1. El conjunto de estos números primos crea la base de factores.

Luego, se procede a calcular los números cuadrados del mismo orden que n. Para ello se determina el mayor número entero m menor que $\sqrt{n}$. Aquí, $m = 86$. Entonces, los cuadrados cercanos a n serán $(m-3)^2 = 83^2$, $(m-2)^2 = 84^2$, $(m-1)^2 = 85^2$, $m^2 = 86^2$, $(m+1)^2 = 87^2$, $(m+2)^2 = 88^2$, ..., es decir, en términos generales, $(m+u)^2$, en donde u es un número entero, positivo o negativo, pequeño en relación a m.

Fijamos, por último, el intervalo de criba, es decir, la zona de las u que queremos trabajar. Las diferencias entre n y los números cuadrados, que se denominan números cuadrados reducidos, se apuntan en una lista.

A continuación, hay que identificar los números cuadrados reducidos cuyos factores primos pertenezcan a la base de factores. Podríamos resolverlo mediante divisiones a prueba; iremos más deprisa con un método de criba. Para descubrir qué cuadrados reducidos son divisibles entre un número primo p, se determinan todos los u comprendidos entre 0 y $p-1$ tales que $(m+u)^2 - n$ sea divisible entre p. Si partimos de estos valores para u, obtendremos todos los cuadrados reducidos que sean divisibles entre p.

En el ejemplo resulta que $(m+1)^2 - n$ es divisible por 2. En consecuencia,

u	–3	–2	–1	0	1	2	3
$(m+u)^2-n$	–540	–373	–204	–33	140	315	492
Criba con 2	–135		–51		35		123
Criba con 3	–5		–17	–11		35	41
Criba con 5	–1				7	7	
Criba con 7					1	1	

10. EN LA CRIBA CUADRADA se eligen números cuadrados cercanos al número *n* que se desea descomponer (aquí, *n* = 7429). El número *u* (primera fila) designa estos números cuadrados. A continuación se calculan las diferencias entre cada uno de ellos y *n* (segunda fila; *m* = 86) y se divide este valor tantas veces como se pueda, sin que quede un resto, entre todos los números primos de la base de factores (restantes filas). Por medio de un método de criba se determinan qué columnas podemos dejar de lado. Pero todas aquellas en que aparezca primero un uno se seguirán empleando.

Número de cifras de *n*	50	60	70	80	90	100	110	120
Tamaño de la base de factores en miles	3	4	7,4	15	30	51	120	245
Tamaño del intervalo de criba en millones	0,2	2	5	6	8	14	16	26

11. VERSIÓN MEJORADA de la criba cuadrada, en cuyas características no podemos detenernos. Requiere intervalos de criba (dominios en los que se buscan números cuadrados cercanos) y bases de factores (el conjunto de números primos entre los que tienen que ser divisibles los cuadrados reducidos aprovechables) de distinta talla, según el tamaño del número *n* que se quiera factorizar.

$(m-1)^2 - n$, $(m-3)^2 - n$ y $(m+3)^2 - n$ serán también números pares. (Tras algunas transformaciones, mediante la tercera fórmula binómica.) Los números se dividen y dividen hasta hasta llegar a un número impar; de ahí lo de “criba del 2”, que guarda un remoto parentesco con la criba de Eratóstenes, el método estándar para descubrir números primos.

La criba con tres funciona del mismo modo: se comprueba que $m^2 - n$ y $(m+2)^2 - n$ son divisibles entre 3. Partiendo de $u = 0$ y $u = 2$ damos pasos de longitud 3 hacia la derecha e izquierda, y se divide, en los lugares correspondientes, tantas veces por 3 como sea posible. Parecido método de criba se sigue con los demás números primos de la base de factores. Cuando en los lugares de la lista resultante aparezca un uno, el cuadrado reducido correspondiente puede descomponerse sobre la base de factores mediante divisiones a prueba.

Nos hemos ceñido a la versión más sencilla de la criba cuadrada, una técnica anterior a los ordenadores. Olivier Carissan (1880-1925) construyó un aparato mecánico para realizar la criba con varios números primos a la vez. Para descomponer un número de 100 cifras, hay que avanzar bastante más. La base de factores y el intervalo de criba se hacen enormes.

A mediados de 1993, Arjen K. Lenstra, B. Dodson, Mark S. Manasse y Thomas Denny obtuvieron la factorización de RSA-120, el número de 120 cifras que RSA había sacado a concurso. La base de factores contenía 245.810 elementos; el sistema de ecuaciones a resolver era de 245.810 incógnitas y 252.222 ecuaciones. De haberlo acometido con un solo ordenador, el cómputo hubiese tardado medio siglo.

Además de refinar los algoritmos, la factorización se acelera con el trabajo simultáneo de varios ordenadores. Para ello se pueden utilizar ordenadores de arquitectura en paralelo o bien sistemas distribuidos, como redes de ordenadores. En Sarrebruck, a cuyo universidad pertenecían Manasse y Denny, empleamos una red con 250 estaciones para MCE y las cribas cuadradas.

JOHANNES BUCHMANN, profesor del Politécnico de Darmstadt, recibió en 1993 el premio Leibniz.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A COURSE IN COMPUTATIONAL ALGEBRAIC NUMBER THEORY. H. Cohen. Springer, Heidelberg 1993.

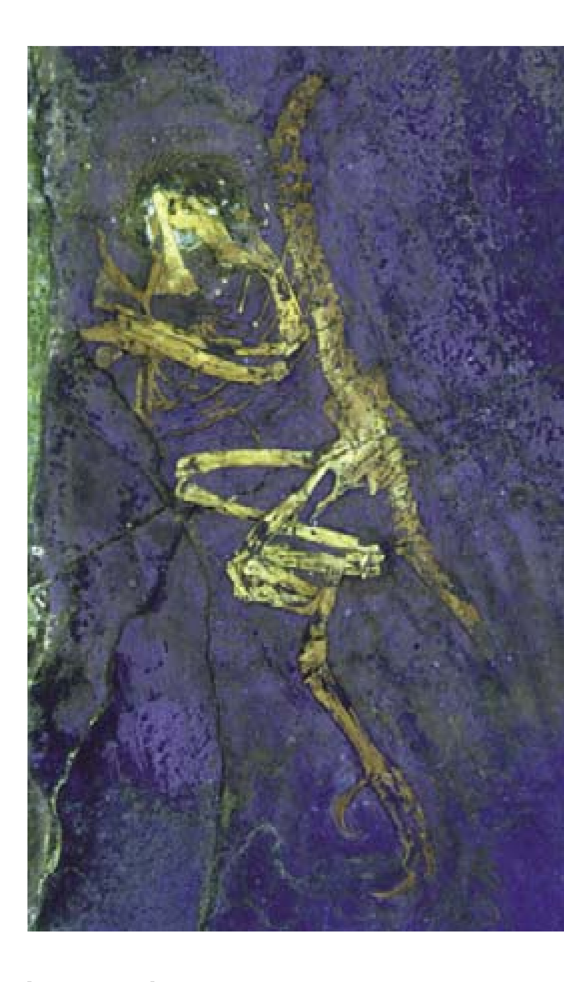
THE DEVELOPMENT OF THE NUMBER FIELD SIEVE. Arjen K. Lenstra y Hendrik W. Lenstra Jr. en *Springer Lecture Notes in Mathematics*, vol. 1554. Springer, Heidelberg 1993.

PRIME NUMBERS AND COMPUTER METHODS FOR FACTORIZATION. Hans Riesel. Birkhäuser, Basilea 1994.

Las aves de Las Hoyas

En un yacimiento del Cretácico inferior de la provincia de Cuenca se está obteniendo información sobre las primeras fases de la historia evolutiva de las aves

José Luis Sanz y Bernardino P. Pérez-Moreno



Hace 120 millones de años, el paisaje de la Serranía de Cuenca era muy diferente del actual. El paisaje montañoso y abrupto, poblado por pinares y sabinares, que vemos hoy, constituía una planicie salpicada de abundantes zonas húmedas. En el transcurso de millones de años, las corrientes fluviales generaron varios lagos que se sucedieron en el tiempo.

El lago de Las Hoyas tuvo una extensión máxima de unos 60 kilómetros cuadrados. Crecía en sus contornos una vegetación particular. En el Cretácico inferior abundaban los helechos arborescentes y las coníferas; había también cicadales y benetitales. En Las Hoyas se han hallado incluso restos de angiospermas. Estas plantas con flores, dominantes en las floras actuales, aparecieron durante la época en que se formaron los sedimentos que constituyen el yacimiento. Los fósiles de hojas aisladas hallados en esta localidad conquense acreditan su existencia en España durante esa época, si bien la mayoría de los restos botánicos del yacimiento pertenecen a *Montsechia*, género enigmático cuyos restos sólo se conocen en el Cretácico inferior ibérico.

Los restos de organismos animales procedentes de Las Hoyas pertenecen a dos ambientes distintos: las aguas del lago y la zona entorno. Del centenar de especies desenterradas, un cuarenta por ciento son insectos, cifra llamativa para un yacimiento paleontológico. Semejante registro nos revela que durante el Cretácico inferior estos artrópodos formaban parte importante de los ecosistemas terrestres y acuáticos.

La entomofauna terrestre está representada por escarabajos, grillos, libélulas, cucarachas, moscas y otros grupos. Por su lado, los insectos acuáticos pertenecen en su mayoría a los hemípteros. Ranas, salamandras y lagartos se alimentaban de insectos. Algunos cocodrilos terrestres, pequeños, serían también entomófagos. Pero las formas mayores ocuparían nichos semejantes a los de los cocodrilos actuales. En su dieta habitual entrarían los peces del lago. Hemos contado hasta 16 grupos distintos entre celacantos, picnodontiformes y teleósteos primitivos.

Entre los macrovertebrados terrestres medraban varios tipos de dinosaurios. Los había carnívoros medianos, saurópodos grandes, ornitópodos del género *Iguanodon* y ornitomimosaurios, representados éstos por el género *Pelecanimimus*. Fue en Las Hoyas donde se descubrió el único espécimen de *Pelecanimimus*, un dinosaurio de hábitos omnívoros. Los dinosaurios terópodos avianos de Las Hoyas, sin embargo, eran probablemente entomófagos. La dieta de estas aves primitivas se basaba en diversos tipos de artrópodos.

La flora y fauna del yacimiento de Las Hoyas se desenvolvían en un ambiente tropical o subtropical y estacionario (con una estación seca y otra húmeda). Los restos fósiles



1. *IBEROMESORNIS ROMERALI*, ave primitiva procedente del Cretácico inferior del yacimiento de Las Hoyas (Serranía de Cuenca). Este esqueleto está prácticamente completo, faltando esencialmente el cráneo y las primeras vértebras cervicales. Aun contando con esta carencia craneal, la hipótesis de relaciones de parentesco de *Iberomesornis* predice que esta ave primitiva tenía dientes.

2. FOTOGRAFIA REALIZADA mediante fluorescencia inducida por luz ultravioleta de *Iberomesornis romerali*. Esta técnica permite, en ocasiones, descubrir restos de tejidos no esqueléticos (como músculo, piel, plumas) no visibles con luz normal. En el caso de *Iberomesornis* permite observar más nítidamente el contorno de los diferentes elementos esqueléticos.

se hallan incluidos en calizas laminadas, creadas por sedimentación en el antiguo lago de Las Hoyas. Estos depósitos han sido objeto de excavación e investigación sistemática por la Unidad de Paleontología de la Universidad Autónoma de Madrid desde hace más de diez años; en ese intervalo de tiempo se han extraído más de 10.000 restos.

Las calizas de Las Hoyas se caracterizan por sus cualidades óptimas para preservar estructuras delicadas, ausentes por lo común en el registro fósil. En sus entrañas han persistido cutículas de plantas e insectos, faneras, zonas tegumentarias e incluso huellas de fibras musculares (como en el caso del ornitomimosaurio *Pelecanimimus*).

Las aves de Las Hoyas están representadas por plumas aisladas y restos óseos, normalmente éstos en articulación. El caso más favorable es, obviamente, la combinación de plumas y huesos, como ocurre en los géneros *Concornis* ("ave de Cuenca") y *Eoalulavis* ("ave de álula primigenia"). Semejante asociación aporta información de sumo interés para desentrañar el origen del vuelo.

Lo mismo las plumas aisladas que las asociadas a restos esqueléticos presentan una estructura muy semejante a la de las aves actuales. No hay en ello ningún misterio encerrado. El ave más antigua conocida, el famoso *Archaeopteryx* (del Jurásico superior de Baviera), poseía ya plumas de arquitectura moderna.

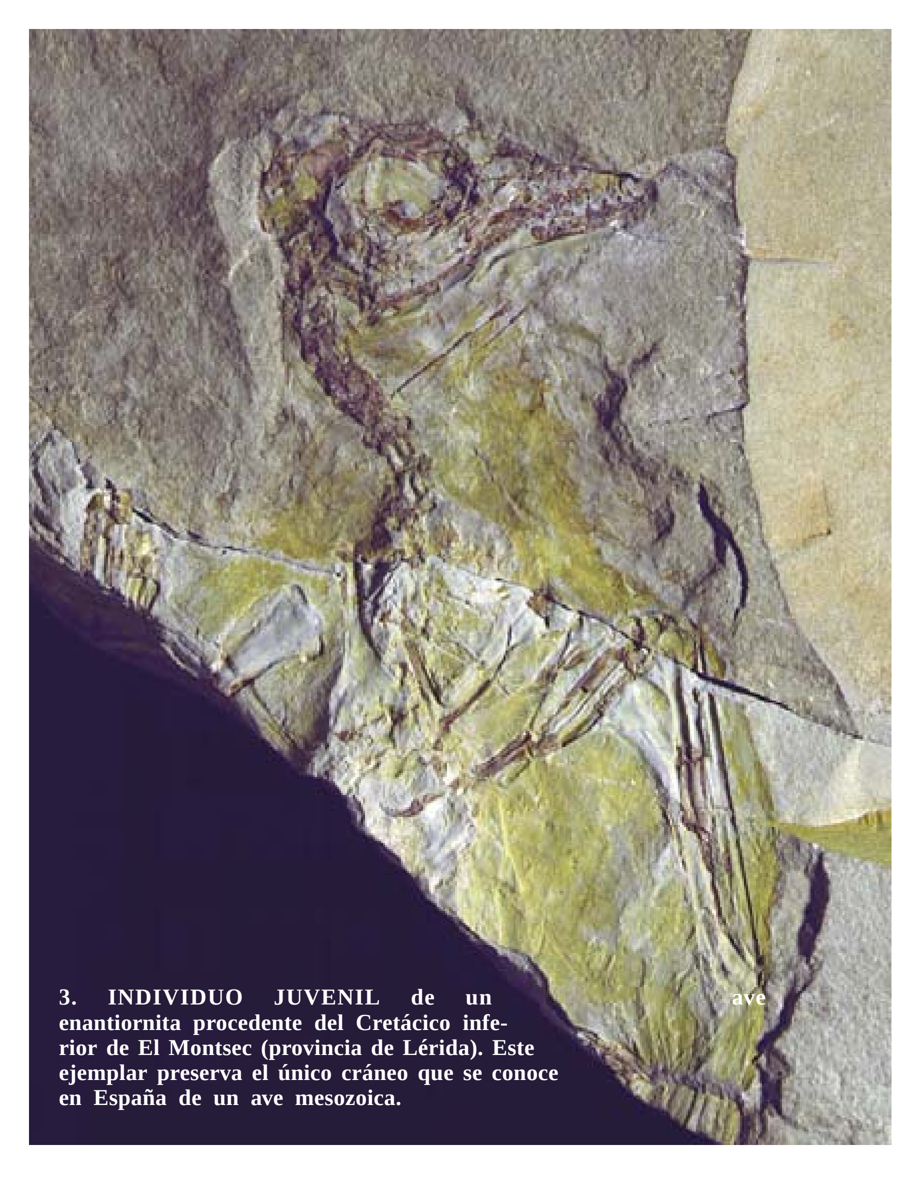
Hasta hace pocos años, la única fuente de nuestro conocimiento sobre el origen de las aves, la aparición de las plumas o el desarrollo de la capacidad de vuelo se apoyaba en *Archaeopteryx*. De ahí la investigación paleornitológica mesozoica saltaba a finales del Cretácico, hace unos 70 millones de años. La escasez de registro del intervalo intermedio, es decir, entre el Jurásico superior y el Cretácico terminal, que abarca otros 70 millones de años, nos privaba de información sobre los acontecimientos que marcaron la historia evolutiva de las aves posterior a *Archaeopteryx*. Pero la situación cambió de raíz con el descubrimiento de las aves de Las Hoyas y otras aves, principalmente en China, del Cretácico inferior.

Tres son los géneros de aves primitivas del yacimiento conquense: *Concornis*, *Eoalulavis* e *Iberomesornis* ("ave intermedia de Iberia"). El nombre del postrer género remite a su mezcla de características, intermedia entre la condición primitiva de *Archaeopteryx* y los rasgos distintivos de las aves modernas.

La estructura de la región pélvica y la extremidad posterior de *Iberomesornis* es primitiva, semejante a la de *Archaeopteryx* e incluso a la de los dromeosáuridos, terópodos no avianos. Pero el ave de Las Hoyas presenta innovaciones que la emparentan con las aves modernas. Destacan el coracoides, la fúrcula y el pigostilo. En la condición ancestral, el coracoides es un elemento asociado a la escápula para formar el escapulo-coracoides. En *Iberomesornis* aparece ya en su configuración actual, en que el hueso se alarga, dibuja una T invertida y actúa a modo de tensor entre la cavidad glenoidea (la región que recibe la cabeza articular del húmero) y el esternón.

La fúrcula (las clavículas fusionadas) de *Archaeopteryx* recuerda el perfil del bumerán por su estructura en V abierta. En las aves modernas e *Iberomesornis* las ramas de la fúrcula se cierran; aparece, además, un proceso medial llamado hipocleidio.

Por último, *Iberomesornis* comparte con las aves que hoy vuelan la adquisición de un pigostilo, estructura generada por la fusión de las últimas vértebras de la cola para dar lugar a un elemento rígido.



3. INDIVIDUO JUVENIL de un ave enantiornita procedente del Cretácico inferior de El Montsec (provincia de Lérida). Este ejemplar preserva el único cráneo que se conoce en España de un ave mesozoica.



4. *CONCORNIS LACUSTRIS*, ave enantiornita del Cretácico inferior de Las Hoyas (Serranía de Cuenca). Aunque no existen restos del cráneo, *Concornis* fue uno de los primeros taxones de enantiornitas representados por un ejemplar razonablemente completo y articulado. Se encuentra preservado gran parte del esqueleto apendicular, tanto anterior como posterior.



5. *EOALULAVIS HOYASI*, ave enantiornita del Cretácico inferior de Las Hoyas (Serranía de Cuenca). La figura ilustra el ejemplar después de haber sido transferido desde la caliza original a una base de resina plástica que incluso copia las plumas. En la mitad de la caja torácica del espécimen puede advertirse un elemento lanceolado que se ha identificado como el esternón. Esta morfología lanceolada es única, desconocida en cualquier otra enantiornita.

La presencia de esas innovaciones evolutivas en *Iberomesornis* puede atribuirse a un refinamiento del mecanismo de vuelo. Si consideramos la distancia anatómica que lo separa de la condición ancestral, retenida en *Archaeopteryx*, podremos proponer la hipótesis según la cual las aves, hace entre 145 y 120 millones de años, experimentaron una presión de selección que configuró las estructuras mínimas necesarias para la consecución de un vuelo activo, propulsado.

Pudiera sorprendernos la pequeñez de las aves del Cretácico inferior. *Iberomesornis* viene a alcanzar la talla de un gorrión. Desde los grupos hermanos del clado Aves, los terópodos no avianos más derivados, hasta *Iberomesornis*, pasando por *Archaeopteryx*, se registra una notable reducción del tamaño. (Llámase grupos hermanos en sistemática cladística a los dos taxones producidos por una dicotomía, cada uno es el pariente más cercano del otro.) La tendencia hacia la reducción responde a una necesidad biomecánica; la adquisición del vuelo cuesta menos en tetrápodos pequeños y dotados de poca biomasa.

Tal combinación de caracteres primitivos y derivados sitúa a *Iberomesornis* en una posición intermedia, desde una perspectiva filogenética, entre *Archaeopteryx* y las aves modernas. En los cladogramas ocuparía el nudo de arranque de los Ornithothoraces, donde se incluye al precursor más cercano compartido por *Iberomesornis* y las aves modernas y a todos sus descendientes. De este modo, se propone al ave de Las Hoyas como grupo hermano de un conjunto de aves que a su vez se estructuran en los clados de las enantiornitas y las ornituras. (Llámase clado a cualquier taxón monofilético.) En las ornituras se encuadran las aves actuales. Sus primeros representantes aparecen durante el Cretácico inferior. De gran éxito evolutivo, cuentan ahora con unas 9000 especies de forma, tamaño y nicho ecológico muy dispares.

De las enantiornitas sólo quedan fósiles. Los primeros hallazgos des-

JOSE LUIS SANZ y BERNARDINO P. PEREZ-MORENO estudian la anatomía y filogenia de dinosaurios en la Universidad Autónoma de Madrid, donde Sanz es catedrático de paleontología y Pérez-Moreno realiza su tesis doctoral sobre los dinosaurios terópodos de Las Hoyas.

cribían restos del Cretácico superior del norte de Argentina. Hoy sabemos que vivían ya en el Cretácico inferior. Además, se trata de un clado de amplia distribución geográfica, con presencia en yacimientos de ambas Américas, Australia, China y España.

El material español de enantiornitas está representado por un espécimen del yacimiento ilerdense de El Montsec y por dos géneros del yacimiento de Las Hoyas: *Concornis* y *Eoalulavis*. El ave de El Montsec, que preserva el primer cráneo de ave mesozoica del registro español, es el polluelo más antiguo que se conoce. Esta condición juvenil del ejemplar ha permitido comparar el crecimiento de las aves modernas con el de las enantiornitas, habiéndose hallado ciertas similitudes en los patrones de osificación de ambos grupos.

Del género *Concornis* sólo se ha encontrado un individuo de un tamaño aproximado al del mirlo. Entre sus rasgos distintivos sobresale un esternón aquillado, con una carena que se dispone sólo en su región posterior.

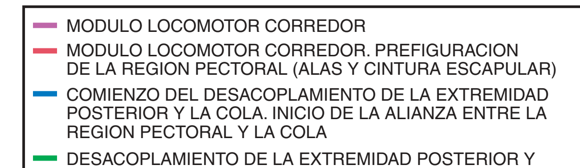
Los restos encontrados en Las Hoyas de *Eoalulavis* han persistido magníficamente conservados, con las plumas en su posición original. Las proporciones de *Eoalulavis* recuerdan las de un jilguero. El espécimen aporta una valiosísima prueba trófica, la más antigua que ofrece el registro fósil mundial para las aves; en el interior de su cavidad torácica presenta, incluidos en una masa limonitizada, restos de minúsculos caparazones de crustáceos que evidencian sus hábitos alimentarios. Este tipo de dieta guarda coherencia con un régimen de vida limícola, una hipótesis que ya había sido propuesta para las aves de Las Hoyas.

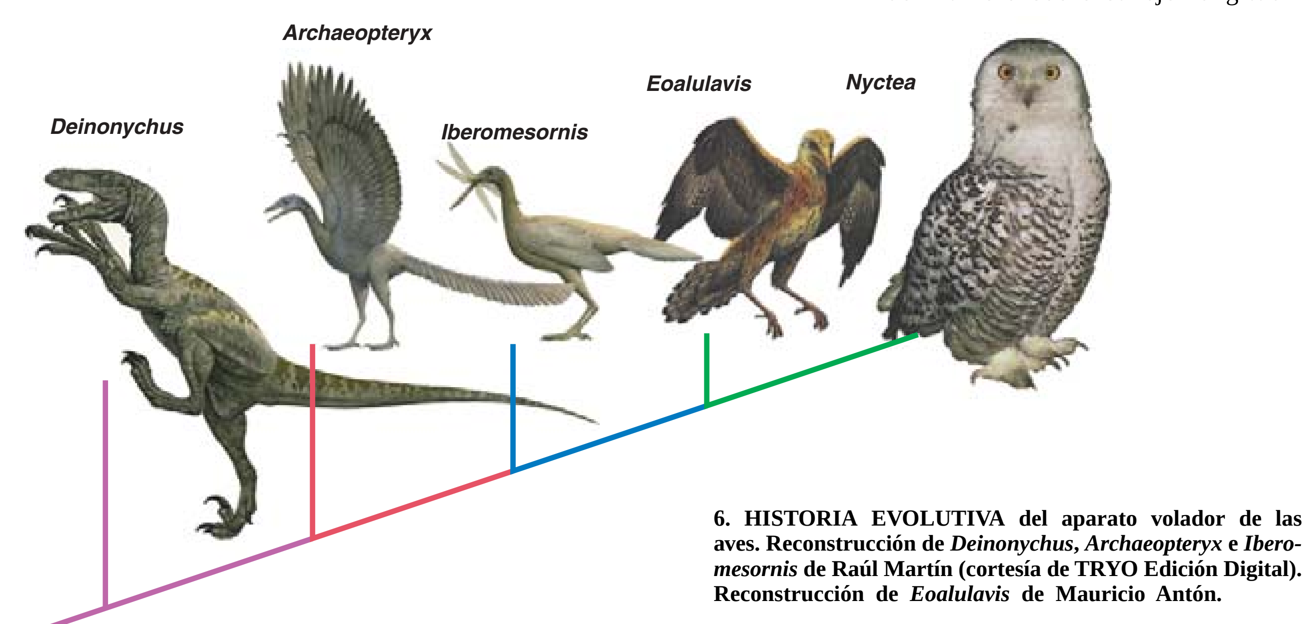
En la investigación del registro fósil aviano del yacimiento conquense buscamos, sobre todo, desentrañar el origen del vuelo. Las aves han adquirido una arquitectura especial —el aparato volador— para vencer la fuerza de la gravedad. Dicha estructura consta de tres regiones: ósea, muscular y plumas.

El registro fósil contiene información sobre el aparato volador esquelético y, en determinados casos, de las plumas. Para conocer la condición esquelética ancestral de las aves hemos de acudir a los dromeosáuridos, dinosaurios que incluyen géneros como *Deinonychus* y *Velociraptor*. En estos terópodos, el módulo locomotor (subregión del sistema musculo-esquelético integrada para las funciones de progresión) se establece mediante una asociación entre las extremidades posteriores y el apéndice caudal, elemento que desempeña funciones de balancín y timón. El apéndice sirve también de base para la musculatura caudo-femoral, encargada de retraer la extremidad posterior.

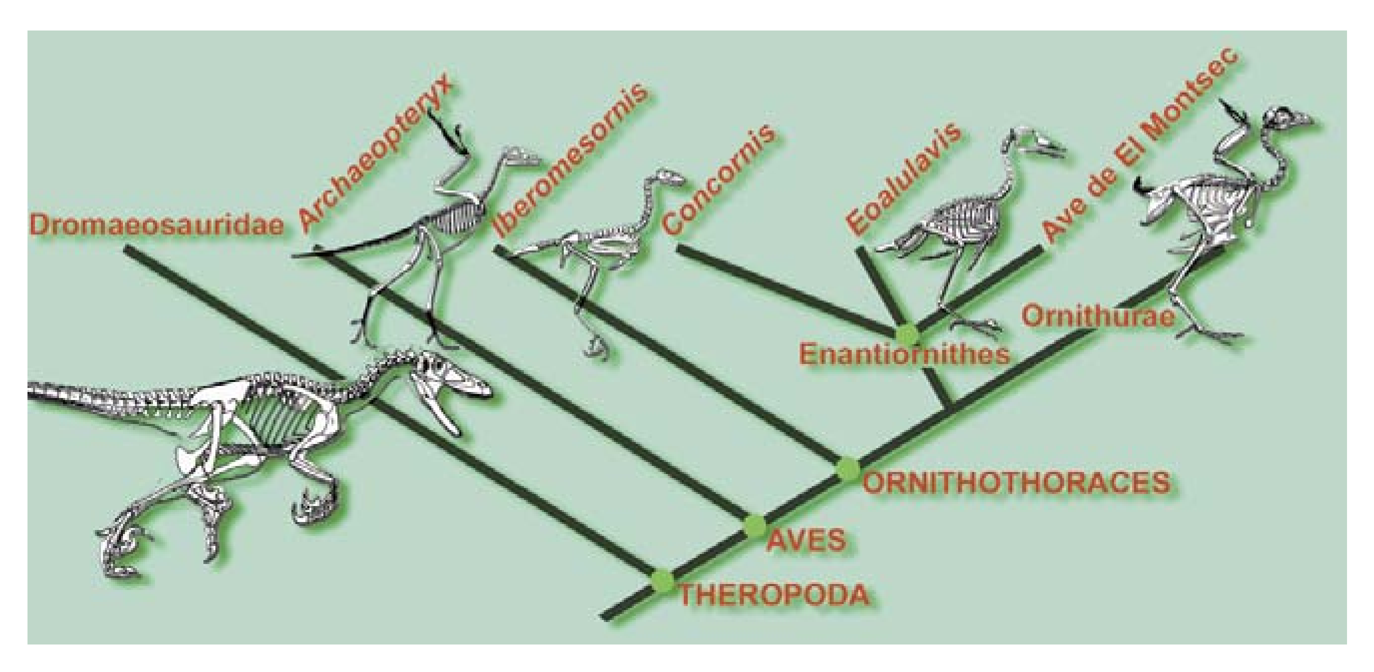
Así pues, la condición aviana ancestral está caracterizada por animales terrestres, ágiles corredores cuyo sistema de progresión se basa en la combinación funcional de patas y cola. Este módulo locomotor corredor permanece en *Archaeopteryx*, el ave más primitiva. Pero el famoso género del Jurásico superior alemán se caracteriza también por una modificación de las extremidades anteriores, cuyas proporciones se acercan a las del esqueleto alar de las aves modernas. Por ello, *Archaeopteryx* presenta una combinación singular; retiene el módulo locomotor corredor ancestral y prefigura la región esquelética pectoral propia de aves modernas.

El esqueleto volador de *Iberomesornis* incorpora novedades evolutivas que no observamos todavía en *Archaeopteryx*. La morfología coracoidal del ave de Las Hoyas revela la presencia de foramen trióseo, una estructura compartida por las aves modernas. El foramen da salida al tendón del músculo supracoracoideo, esencial para las funciones de vuelo al permitir una rotación del húmero sobre su eje longitudi-





6. HISTORIA EVOLUTIVA del aparato volador de las aves. Reconstrucción de *Deinonychus*, *Archaeopteryx* e *Iberomesornis* de Raúl Martín (cortesía de TRYO Edición Digital). Reconstrucción de *Eoalulavis* de Mauricio Antón.



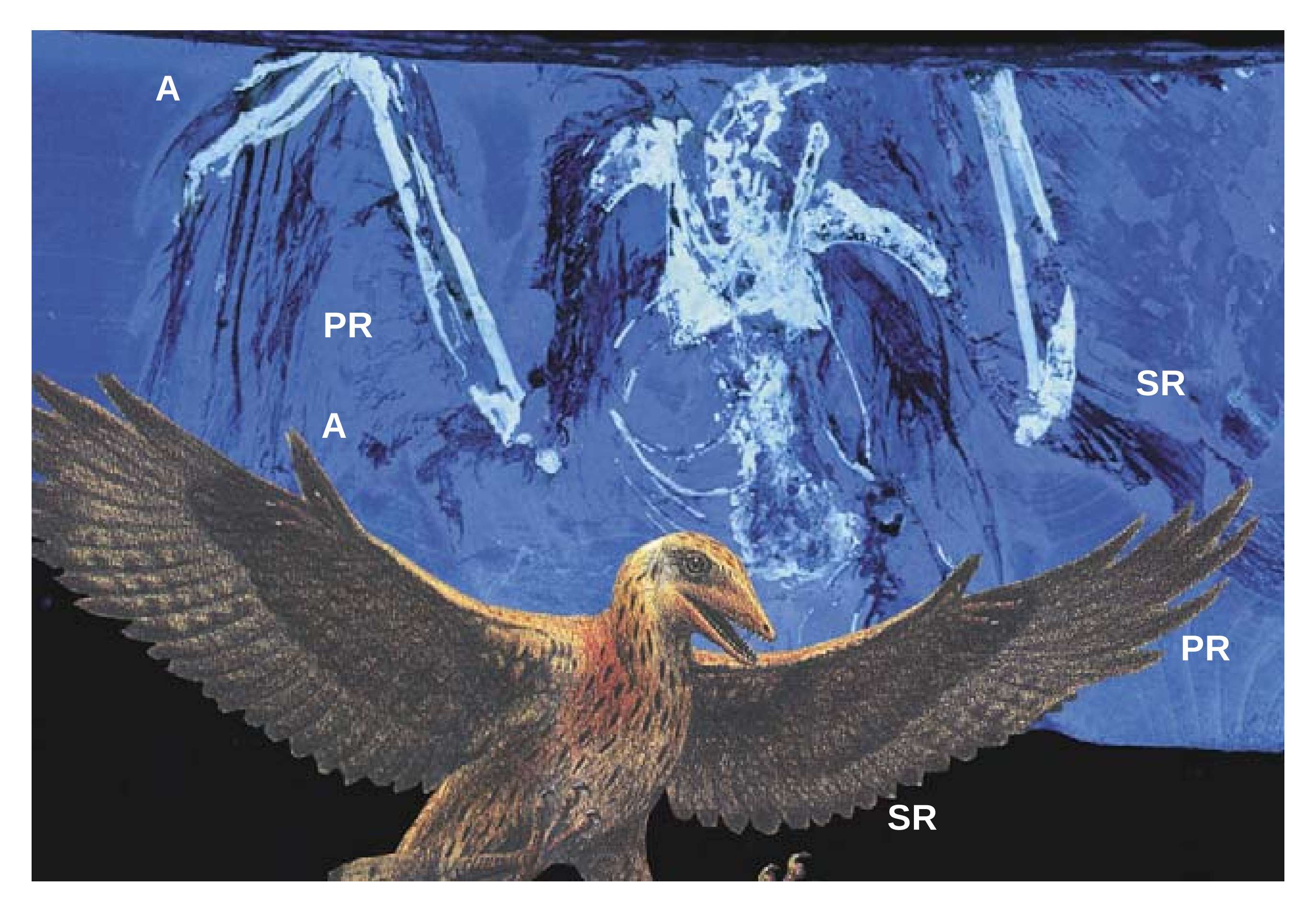
7. FILOGENIA AVIANA. Los dromeosáuridos son considerados como el grupo hermano más cercano a las aves. Estas últimas incluyen al antecesor común de *Archaeopteryx* y las aves actuales y a todos sus descendientes. El clado Ornithothoraces incluye al antecesor común de *Iberomesornis* y las aves actuales y a todos sus descendientes. El clado Ornithurae agrupa no sólo a las aves actuales sino también determinados taxones del registro fósil, como Ichtyornithiformes y Hesperornithiformes.

nal, imprescindible para preparar la fase depresora (el movimiento hacia abajo) del ala.

Fúrcula y pigostilo de *Iberomesornis* cumplirían funciones semejantes a las de las aves modernas. La fúrcula serviría, pues, para ventilación de los pulmones y sacos aéreos durante el vuelo. El pigostilo de *Iberomesornis* sería, no obstante, mayor que el de sus parientes actuales. Su adquisición indica la aparición de una rabadilla, donde irían conectadas las plumas timoneras. Habría también un bulbo rectricial capaz de abrir y cerrar las plumas. Esta capacidad refuerza la estrategia de vuelo, ya que facilita el frenado y los cambios de dirección.

Por consiguiente, *Iberomesornis* habría alcanzado un grado de adaptación al vuelo muy superior al logrado por *Archaeopteryx*. ¿Igual que el de las aves modernas? No. En las ornituras ha desaparecido la alianza entre el apéndice caudal y las extremidades posteriores, que configuraba el módulo locomotor corredor primitivo; la progresión en tierra corre a cargo exclusivo del esqueleto apendicular posterior, sin que intervenga ya el apéndice caudal. La musculatura caudal ha dejado de participar en el movimiento de la pata posterior, para ocuparse sólo de controlar las plumas timoneras.

8. DETALLE del extremo distal del ala de *Eoalulavis hoyasi*. A: álula (plumas unidas al primer dedo de la mano). PR: Rémiges primarias (plumas unidas a los dedos internos de la mano).



9. FOTOGRAFIA realizada mediante fluorescencia inducida por luz ultravioleta de *Eoalulavis hoyasi* (antes de la preparación del ejemplar), y reconstrucción del posible aspecto en vida. Abreviaturas: A, álula; PR, plumas rémiges primarias; SR, plumas rémiges secundarias. Reconstrucción de *Eoalulavis* de Mauricio Antón.

Además, las ornituras se caracterizan por una nueva alianza entre la región pectoral (alas y cintura escapular) y la cola para lanzarse al vuelo. Esta alianza quizá se inició con *Iberomesornis*. No obstante, parece improbable que, dado el enorme tamaño de su serie caudal, ésta se hubiese desvinculado por entero de su asociación con las extremidades posteriores para la progresión terrestre. Es decir, la cola en *Iberomesornis* facilitaría el vuelo lo mismo que la carrera.

En definitiva, y aunque es difícil precisar la capacidad voladora de *Archaeopteryx* e *Iberomesornis*, parece probable que esta última habría desarrollado un nivel morfológico de adaptación al vuelo intermedio entre el del ave primigenia y los representantes modernos.

Por lo que respecta al plumaje, el ejemplar de *Eoalulavis* tiene álula, plumas del primer dedo de la mano. Se trata de una estructura obligada en la mayoría de aves voladoras actuales. Para frenar, el ave tiende a verticalizar la superficie del ala de suerte que aumente la resistencia al avance. Pero ese movimiento genera turbulencias en la región dorsoposterior del ala, lo que acarrea una pérdida de sustentación, con el consiguiente peligro de caída en barrena, riesgo que evita abriendo el álula. Con ello se incrementa la tasa de flujo laminar de aire por encima del ala, disminuyen o incluso se desvanecen las turbulencias, lo que asegura el mantenimiento de la capacidad de sustentación. Las pruebas aportadas por *Eoalulavis* implican que las aves habían conseguido ya tan sorprendentes habilidades de vuelo hace unos 120 millones de años, lo que explicaría el éxito evolutivo del grupo, manifestado en su pluriforme diversificación.

Los resultados de Las Hoyas respaldan la hipótesis del origen dinosauriano de las aves. Son, efectivamente, dinosaurios especializados en el vuelo. Por decirlo en un lenguaje más técnico, las aves pertenecen al taxón monofilético de los Dinosauria.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

AN EARLY CRETACEOUS BIRD FROM SPAIN AND ITS IMPLICATIONS FOR THE EVOLUTION OF FLIGHT. J. L. Sanz, L. M. Chiappe, B. P. Pérez-Moreno, A. D. Buscalioni, J. J. Moratalla, F. Ortega y F. J. Poyato-Ariza, en *Nature*, vol. 382, págs. 442-445, 1996.

A NESTLING BIRD FROM THE LOWER CRETACEOUS OF SPAIN: IMPLICATION FOR AVIAN SKULL AND NECK EVOLUTION. J. L. Sanz, L. M. Chiappe, B. P. Pérez-Moreno, J. J. Moratalla, F. Hernández-Carrasquilla, A. D. Buscalioni, F. Ortega y F. J. Poyato-Ariza, D. Rasskin-Gutman y X. Martínez-Delclós, en *Science*, vol. 276, págs. 1543-1546, 1997.

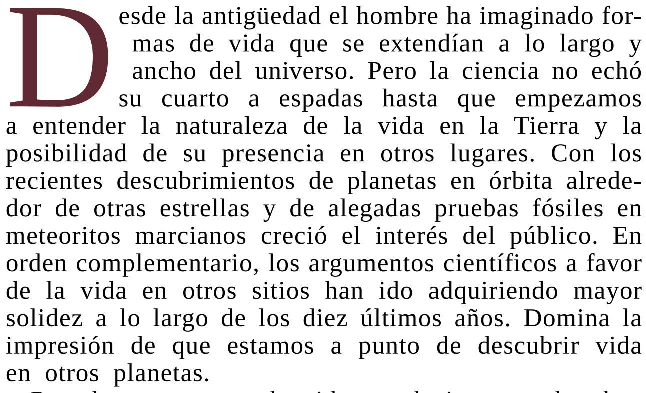
HISTORIA NATURAL DE LOS DINOSAURIOS. J. L. Sanz, J. J. Moratalla, B. P. Pérez-Moreno y R. Martín. Tryo Edición Digital, Madrid. CD-ROM, 1997.

Búsqueda de vida en el sistema solar

Si la vida se desarrolló también en otros planetas o satélites, ¿cuáles serían los lugares donde habría que buscar pruebas de existencia de organismos extraterrestres?

Bruce M. Jakosky





Desde la antigüedad el hombre ha imaginado formas de vida que se extendían a lo largo y ancho del universo. Pero la ciencia no echó su cuarto a espadas hasta que empezamos a entender la naturaleza de la vida en la Tierra y la posibilidad de su presencia en otros lugares. Con los recientes descubrimientos de planetas en órbita alrededor de otras estrellas y de alegadas pruebas fósiles en meteoritos marcianos creció el interés del público. En orden complementario, los argumentos científicos a favor de la vida en otros sitios han ido adquiriendo mayor solidez a lo largo de los diez últimos años. Domina la impresión de que estamos a punto de descubrir vida en otros planetas.

Para buscar rastros de vida en el sistema solar, hay que empezar por lo que tenemos a mano. La Tierra, único ejemplo de planeta dotado de vida, nos permite identificar las condiciones necesarias para que se dé; mas, al acotar tales condiciones, convendrá determinar si son específicas de la vida en la Tierra o presentan la generalidad suficiente para aplicarlas por doquier.

De acuerdo con el registro geológico, la vida se inició en la Tierra en cuanto asomaron circunstancias favorables, una vez que los protoplanetas dejaran de bombardearla cuando se acercaba al final de su formación. El último impacto gigante "esterilizador de la Tierra" aconteció hace quizás entre 4000 y 4400 millones de años. Las células microscópicas fósiles y las pruebas mediante isótopos del carbono sugieren que la vida se había generalizado hace 3500 millones de años, habiendo existido desde unos 350 millones antes.

Alcanzadas las exigencias mínimas, no pasaron 500 millones de años, y quizá sólo 100 o 200 millones, para que la vida echara raíces en la Tierra. Tan breve



1. LOS VALLES DENDRITICOS DE MARTE recuerdan sistemas de drenaje fluvial terrestres. Miden un kilómetro de ancho por cientos de metros de profundidad. Predominan en terrenos antiguos salpicados de cráteres; pudieron abrirlos la precipitación atmosférica o la afloración de aguas subsuperficiales. Comparados con los sistemas de drenaje terrestres, los valles marcianos muestran una densidad de canales (número de canales por kilómetro cuadrado) más baja, lo que sugiere que en las primeras fases del planeta rojo el agua era menos abundante que en la Tierra.

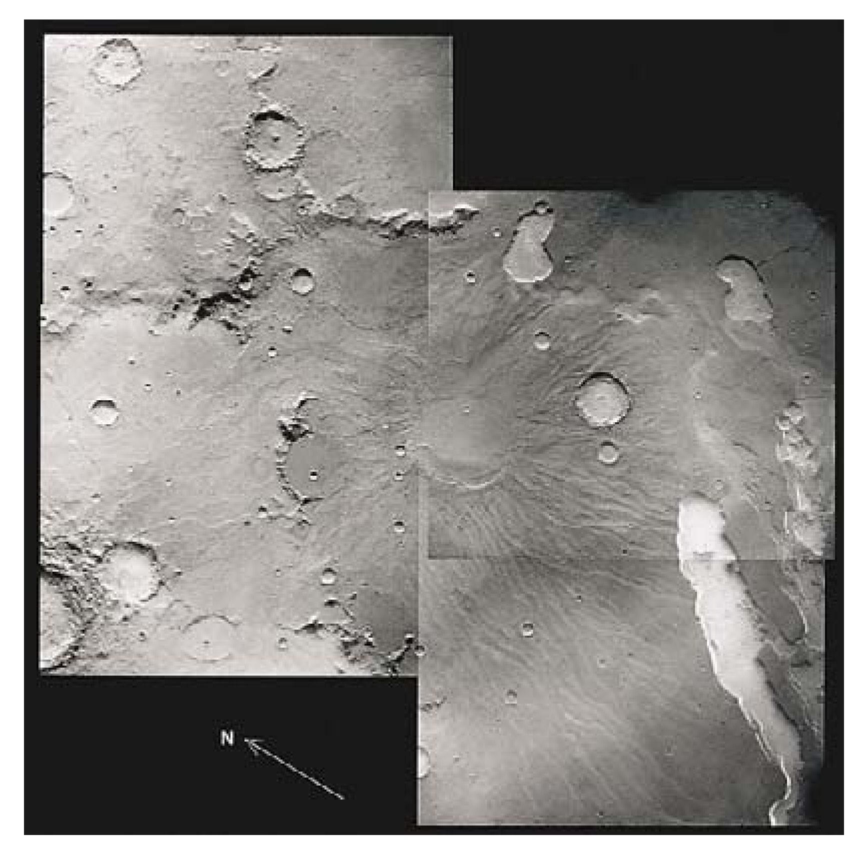
intervalo de tiempo revela que la vida surgió a través de un proceso bastante sencillo, fruto de reacciones químicas en un medio de intensa actividad geológica. A tenor de esa observación, la vida podría aparecer por mecanismos parecidos doquiera se den las condiciones químicas y ambientales que concurrieron en nuestro planeta.

Según la tesis predominante en los 40 últimos años, las moléculas orgánicas prebiológicas se formaron en una atmósfera reductora y encontraron, en rayos y relámpagos, la fuente de energía necesaria para desencadenar las reacciones químicas entre moléculas gaseosas. Más sugestiva es otra teoría, reciente. Al circular por sistemas volcánicos del fondo oceánico, el agua se calienta a temperaturas por encima de 400 grados Celsius. Cuando esta agua sobrecalentada retorna al océano, provoca la reducción química de los agentes y facilita la constitución de moléculas orgánicas. Este ambiente reductor proporciona también una fuente de energía que posibilita la combinación de moléculas orgánicas en estructuras mayores y favorece unas reacciones metabólicas primitivas.

La importancia de los sistemas hidrotermales en la evolución bioquímica se pone de manifiesto en el "árbol de la vida", construido a partir de secuencias genéticas en moléculas de ácido ribonucleico (ARN), portadoras de la información genética. El árbol se dibuja tomando por criterio las diferencias en las secuencias de ARN comunes a todos los seres vivos. Los organismos que han evolucionado poco desde su separación del último antepasado común presentan secuencias de bases de ARN similares; los organismos más próximos a la "raíz" —último antepasado compartido por todos los seres vivos— son hipertermófilos, es decir, viven en agua caliente, posiblemente hasta temperaturas de 115 grados Celsius. De tamaña relación se desprende que la vida atravesó los sistemas hidrotermales en alguna época primitiva o que incluso nació en el seno de dichos sistemas; en cualquier caso, los primeros pasos se dieron en íntima conexión con los sistemas hidrotermales.

Al abordar la aparición de la vida en otras partes del sistema solar, podemos generalizar las condiciones ambientales requeridas para su nacimiento y desarrollo. De entrada, se precisa agua líquida, medio a través del cual los organismos adquieren nutrientes y dispersan los residuos. Aunque otros líquidos, así el metano o el amoníaco, podrían cumplir la misma función, es probable que el agua abundara en mayor cuantía y resultaría mucho mejor, desde una perspectiva química, para provocar las reacciones que instaran la actividad biológica.

Para crear los ladrillos del edificio de la vida, los elementos biogénicos tienen que estar al alcance. En la Tierra, hemos de citar el carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y fósforo entre la veintena de elementos fundamentales para vivir. Aunque en otros lugares quizá



2. CANAL DE DESAGÜE CATASTROFICO en Marte —Valle del Dao— en el borde del volcán Hadriaca Patera. El calor producido por el volcán pudo haber dilatado el agua superficial que emergió, tal vez en forma eruptiva, a la superficie. La posible combinación de energía volcánica y agua convierte a este lugar en sumamente atractivo para la búsqueda de vida.

no se emplearan los mismos elementos, cabe suponer que la vida se fundara en muchos de ellos. En nuestro planeta, la vida utiliza el carbono (por encima del silicio), no tanto por su abundancia cuanto por su versatilidad en la formación de enlaces químicos. El dióxido de carbono es un compuesto común, disponible en forma gaseosa o disuelto en agua; por contra, el dióxido de silicio no abunda en ninguna de las dos formas y sería mucho menos accesible. Dada la ubicuidad en el cosmos de las moléculas orgánicas que contienen carbono, cabe presumir que éste desempeñe un papel decisivo en la vida cualquiera que sea el lugar.

Se precisa, por supuesto, una fuente de energía que fuerce el desequilibrio químico que provoca las reacciones necesarias para dar lugar a sistemas vivos. En nuestro planeta, hoy, casi toda la energía sustentadora de la vida procede del Sol, vía fotosíntesis. Pero bastan las fuentes químicas de energía; probablemente, serían incluso más accesibles para la vida en un comienzo. No excluimos la energía geotérmica de los sistemas hidrotermales próximos a los volcanes, ni la energía química de la erosión de minerales de la superficie del planeta.

Salgamos de la Tierra. Hay dos planetas que exhiben indicios notables de haber reunido las condiciones ambientales propicias para la vida en alguna época de su historia: Marte y Europa. (Consideraremos a este respecto cuerpo planetario a Europa, satélite de Júpiter.)

Marte ha perdido su carácter hospitalario. La temperatura media diaria raramente supera los 220 kelvin, unos 53 kelvin por debajo del punto de congelación del agua. Pese a lo cual, su superficie presenta múltiples signos de un pasado con agua líquida, fluido encerrado ahora quizás en su corteza.

Las redes de valles dendríticos en el relieve marciano más antiguo recuerdan las creadas en la piel de la Tierra por cursos de agua. Pudo ésta proceder de la precipitación atmosférica o emerger de un acuífero de la corteza. La estructura dendrítica de los valles da fe de una formación paulatina de los mismos, señal de cursos de agua antaño, pero no hoy según parece.

Además, se observan viejos cráteres de impacto cuyo diámetro supera los 15 kilómetros sometidos a intensa degradación, desprovistos de mantos que se hubieran tejido con los productos expulsados y con los picos centrales o los bordes elevados (carácter típico de un cráter reciente.) Algunos cráteres erosionados en parte muestran en sus paredes barrancos que se diría labrados por el agua. La erosión ha barrido los cráteres de menos de 15 kilómetros, y el agente erosivo sería el agua superficial.

Aunque desconocemos la historia de la atmósfera de Marte, pudo ésta haber sido más densa en sus primeras fases, hace 3500 o 4000 millones de años. Una atmósfera más densa ejercería un intenso efecto de invernadero, que calentaría el planeta lo suficiente para permitir que el agua corriera líquida. En fecha más cercana a nosotros, la corteza del planeta alberga mucha agua; hay signos para afirmarlo. Unas inundaciones catastróficas, que cuartearon la corteza suprayacente, abrieron grandes canales de desagüe. Eran inundaciones que se producían periódicamente durante los tiempos geológicos. Por ello, debía de haber agua líquida a varios kilómetros de profundidad, donde el calentamiento geotérmico elevaría la temperatura hasta el punto de fusión del hielo.

Marte ha dispuesto, a lo largo de su historia, de ricas fuentes de energía. Desde un momento temprano hasta un ayer próximo, el vulcanismo suministraba calor; también, los impactos. La erosión de rocas volcánicas aporta energía adicional para mantener la vida. La oxidación del hierro en el interior del basalto, por ejemplo, libera energía a disposición de los organismos.

La abundancia de elementos biogénicos en la superficie de Marte cierra el círculo de las condiciones requeridas para la vida. Con agua y energía, en Marte

BRUCE M. JAKOSKY es profesor de geología y miembro del laboratorio de física atmosférica y espacial de la Universidad de Colorado en Boulder. Forma parte del grupo de expertos adscrito a la misión *Explorador Global de Marte,* satélite en órbita alrededor del planeta rojo.

pudo darse vida, originada allí. Y si no apareció en el planeta, también pudo conocerla. Igual que los impactos violentísimos arrojaron rocas de la superficie marciana al espacio —para caer en la Tierra constituidos en meteoritos— las rocas de aquí pudieron muy bien haber alcanzado el planeta rojo. Si en esas piezas había bacterias capaces de soportar el viaje y que aterrizasen en un medio adecuado, sobrevivirían. Nada obsta que la vida, forjada en Marte, terminara por trasplantarse a la Tierra.

Por lo que concierne a la energía, Marte posee la suficiente para posibilitar la vida. Queda por saber si se desarrolló la fotosíntesis y, con ella, la ocupación de otros nichos ecológicos. Los datos proporcionados por la sonda *Viking* en los años setenta no avalaban la tesis de una propagación general de la vida en Marte. Ello no obsta para que exista en alguna forma, enclaustrada en nichos ricos en energía y agua: tal vez en sistemas hidrotermales subsuperficiales, calentados por acción volcánica, o simplemente bajo el suelo, obteniendo la energía de interacciones químicas entre el agua líquida y la roca.

Del análisis de meteoritos caídos en nuestro planeta extraen algunos la conclusión de que la vida pudo haber florecido en Marte. El criterio determinante es la interpretación de "restos fósiles" observados en la roca. Pero nada mueve a aceptar que se trate de entidades biológicas, antes bien podrían resultar de procesos geoquímicos naturales. Mas, aun cuando quedara establecido que los meteoritos en cuestión no encierran indicio alguno de vida, ésta seguiría siendo posible en el planeta rojo, confinada tal vez a zonas sin explorar. Para afirmar algo con seguridad habrá que investigar las regiones cuyas características hagan viable la aparición de la vida (o revelen indicios de que existió).

Europa ofrece un posible marco diferente para el origen de la vida. A primera vista, diríase que es un lugar improbable para el fenómeno. El mayor de los satélites de Júpiter, Europa, es un poco menor que nuestra Luna; hielo casi puro cubre su superficie. Pero el interior quizá sea menos frío, aliviado por la combinación de desintegración radiactiva y calentamiento de marea, que podría elevar la temperatura por encima del punto de fusión del hielo a escasa profundidad. Puesto que la potencia de la capa de hielo oscila entre 150 y 300 kilómetros, bajo la misma pudiera esconderse un océano entero.

Las imágenes de la superficie de Europa que ha enviado la sonda *Galileo* sugieren la presencia probable de bolsas de agua líquida, al menos temporales. Considerada en su globalidad, la superficie aparece

¿Restos microbianos de Marte?

En 1984, Roberta Score exploraba en el Campo de Hielo del Lejano Oeste, en la región antártica de Allan Hills. De su llanura de hielo azulado, de 10.000 años de antigüedad, azotada por el viento, extrajo una roca curiosa de un gris verdoso. De regreso en el Centro Espacial Johnson, de la NASA, y en la Universidad de Stanford, confirmaron los expertos que la piedra, del tamaño de una patata y de 1,9 kilogramos de peso —designada ALH84001—, era un meteorito de Marte, con mucha historia que contar.

Cristalizó hace 4500 millones de años, poco después de la formación de Marte, y fue expulsado del planeta por un poderoso impacto que lo lanzó violentamente al espacio durante 16 millones de años hasta caer en la Antártida hace 13.000 años. Según el dictamen de los geoquímicos, la distribución de isótopos de oxígeno, minerales y aspectos estructurales concordaba con los de otros cinco meteoritos identificados como procedentes de Marte.

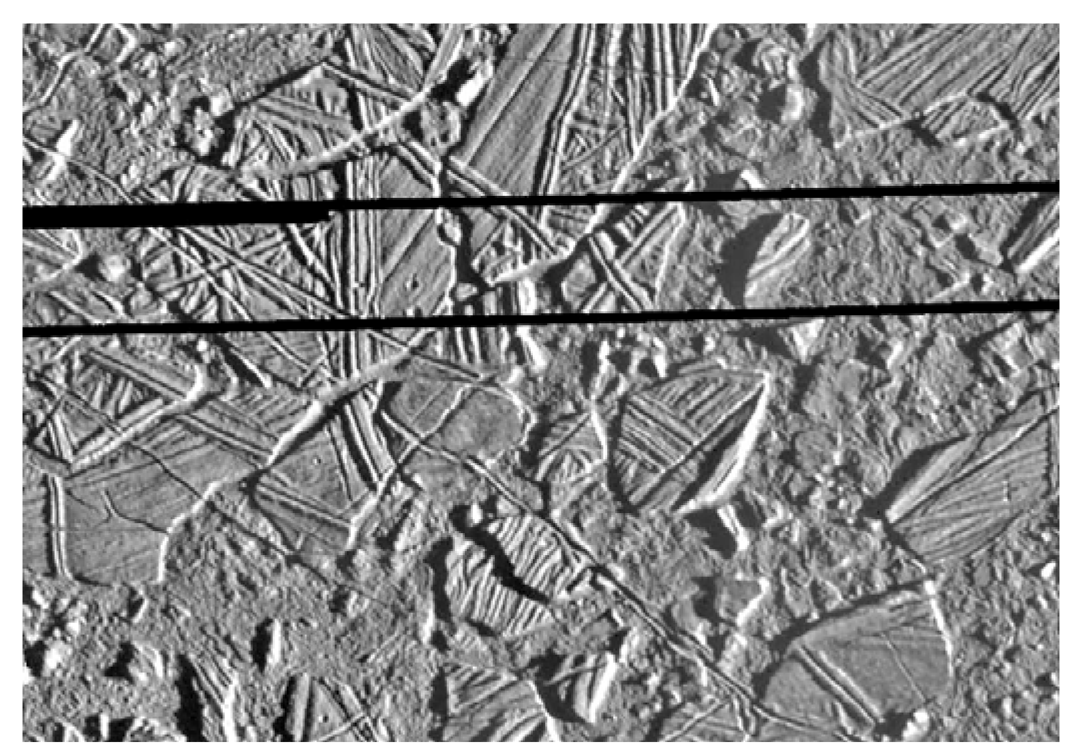
Recubriendo las paredes de las fracturas del interior del meteorito hay glóbulos carbonatados, esferas aplanadas que mide cada una de 20 a 250 micrometros (millonésimas de metro). Los glóbulos parecen haberse formado en un fluido, agua quizá, saturado de dióxido de carbono, hace entre 1300 y 3600 millones de años. Dentro de esos glóbulos se dibujan figuras curiosas que evocan vagamente restos de antiguos microbios marcianos.

En los glóbulos se incluyen granos mínimos de óxido y sulfuro de hierro, así ciertos hidrocarburos policíclicos aromáticos, que suelen asociarse a microorganismos en descomposición. Otras estructuras ovoidales y tubulares remedan bacterias terrestres fósiles. Aunque las estructuras varían entre 30 y 700 nanómetros (milmillonésimas de metro) de longitud, algunos de los tubos miden 380 nanómetros de longitud, tamaño próximo al límite inferior del de las bacterias terrestres, cifrado entre uno y 10 micrometros de largo. Por su tamaño y forma, alguien podría asociar los tubos a fragmentos fósiles de bacterias o de diminutas "nanobacterias", que en la Tierra tienen longitudes de 20 a 400 nanómetros.

Apoyados en esas claves, Everett K. Gibson y David S. McKay anunciaron en agosto de 1996 que en el planeta rojo pudieron medrar, tiempo atrás, los microorganismos. La investigación química ulterior, sin embargo, ha revelado que ALH84001 ha recibido una intensa contaminación de aminoácidos del hielo antártico, resultado que debilita la causa a favor de los microfósiles de Marte. —*Richard Lipkin*



GLOBULO DE CARBONATO (*derecha*) de unos 200 micrometros de longitud; se formó, al parecer, en el meteorito marciano ALH84001. Hay en el glóbulo un cuerpo segmentado (*izquierda*), de unos 380 nanómetros de longitud; guarda una difusa semejanza con bacterias fósiles terrestres.

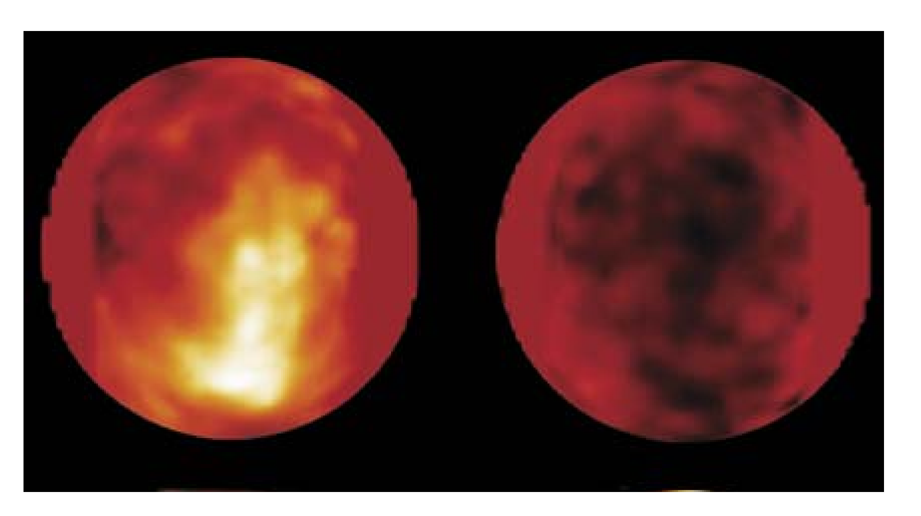


3. LA SUPERFICIE DE EUROPA está cruzada por accidentes que nos hablan de una “tectónica de hielos”. Diríase que se desprendieron bloques de hielo, que avanzaron deslizándose sobre nieve semiderretida, si no flotando sobre el agua. Como quiera que fuera, el análisis espectral de la luz reflejada indica hielo de agua casi puro sobre la superficie de Europa. Las barras negras horizontales que atraviesan la imagen designan datos perdidos durante la transmisión interplanetaria.

hendida por surcos y grietas. En una escala menor, esos accidentes, lineales, dibujan estructuras que remiten a una actividad tectónica local relacionada con el hielo y afloramiento del agua subyacente. Y en un análisis todavía más fino, se aprecian bloques de hielo. Siguiendo los surcos entrecruzados, los bloques se han movido con respecto a la masa mayor. Recuerdan lo que acontece en los hielos de la Tierra: grandes bloques desgajados de la masa principal que flotan libres cierta distancia para terminar soldados *in situ*. No podemos determinar si los bloques flotaron en agua líquida o se deslizaron sobre otro hielo más reblandecido. La ausencia de cráteres de impacto sobre el hielo indica que reemerge de continuo hielo nuevo en Europa. Cabe la posibilidad de que el satélite contenga agua líquida, al menos con carácter intermitente.

Si es cierto que hay agua líquida, se hallaría en la interfaz entre el hielo y el núcleo rocoso subyacente. El centro rocoso de Europa encierra a buen seguro actividad volcánica, en un grado similar al de la Luna terrestre, que crujía sin cesar hasta hace unos 3000 millones de años. El vulcanismo del interior del núcleo crearía una fuente de energía para sostener la vida, en igual sentido que la erosión de minerales que reaccionan con el agua. De ese modo, Europa dispondría, pues, de todos los ingredientes exigidos para alumbrar la vida. Cabe, por supuesto, que exista menos energía química en Europa que en Marte; no hay, pues, que esperar un derroche de vida, en la hipótesis de que se dé. Aunque *Galileo* ha detectado moléculas orgánicas y agua congelada en Calisto y Ganimedes, dos de los cuatro satélites galileanos de Júpiter, esos cuerpos celestes carecen de las fuentes de energía demandadas para el sostén de la vida. Sólo Io, otro satélite galileano, produce calor de origen volcánico, pero carece de agua líquida, necesaria para conservar la vida que conocemos.

Marte y Europa siguen siendo los únicos lugares del sistema solar que poseen (o que han poseído) los ingredientes necesarios para engendrar vida. Pero no son los únicos que revisten interés en exobiología. Podemos orientar nuestra mirada hacia Venus y Titán, el mayor de los satélites de Saturno. Venus posee ahora



4. SUPERFICIE DE TITAN, cuyas manchas nos enseñan que no está uniformemente recubierta por un océano de metano y etano, según se venía aceptando. Podría hallarse, por contra, recorrida por una sucesión de lagos y regiones sólidas. Nubes espesas y ricas en aerosoles orgánicos causados por reacciones atmosféricas ciñen al satélite. A menudo se compara Titán con la Tierra en su fase prebiótica.

un calor sofocante de cualquier forma de vida, temperaturas en superficie de unos 750 kelvin, mantenidas por el efecto de invernadero de los gases dióxido de carbono y dióxido de azufre. Cualquier gota de agua líquida que allí hubiera, se perdió hace mucho tiempo en el espacio.

¿Por qué difiere Venus tanto de la Tierra? Si ésta describiera su órbita en torno al Sol a la distancia que lo hace Venus, también abrasaría de calor, con la emisión consiguiente de vapor de agua a la atmósfera y consolidación del efecto de invernadero. La realimentación positiva avivaría el ciclo: a más vapor de agua, mayor calentamiento de invernadero, saturando la atmósfera y disparando las temperaturas. Puesto que la temperatura desempeña tan importante papel en el contenido atmosférico de vapor de agua, lo mismo la Tierra que Venus poseen un umbral de temperatura por encima del cual la realimentación positiva de un creciente efecto de invernadero aumenta sin control. Ese bucle de realimentación llenaría de agua la atmósfera de Venus, lo que a su vez catapultaría sus temperaturas hasta valores muy altos. Por debajo de ese umbral, su clima se habría acercado al conocido en la Tierra.

Pero nada obliga a creer que Venus fuera siempre tan inhóspito. Hace 4000 millones de años, la emisión solar de energía estaba un 30 por ciento por debajo de la actual. Con menos radiación solar, el límite entre climas clementes e incontrolados puede haber caído dentro de la órbita de Venus; el planeta pudo haber alcanzado temperaturas en superficie de sólo 100 grados Celsius por encima de la temperatura actual de la Tierra. La vida podría resistir ese calor; lo observamos en bacterias y otros microorganismos que medran cerca de fuentes termales y chimeneas submarinas. Conforme el Sol adquirió mayor calor, la temperatura de Venus subiría gradualmente hasta que sufrió una transición catastrófica que le reportó una atmósfera densa y cálida. Entra en lo posible que Venus conociera la vida hace miles de millones de años, para borrar luego todo signo de la misma en las altas temperaturas y la actividad geológica desarrolladas. Puesto que el Sol continúa calentándose, la Tierra puede experimentar una transición similar de aquí a unos 2000 millones de años.

En Titán hallamos múltiples signos de actividad quimico-orgánica en su atmósfera, similar a la que pudo haber en la terrestre tras alcanzar una potente capacidad para reducir los agentes químicos. De un tamaño parecido a Mercurio, Titán presenta una atmósfera más espesa que la de la Tierra y formada por nitrógeno, metano y etano. El metano se repone sin cesar desde la superficie o subsuperficie, pues las reacciones fotoquímicas desarrolladas en su atmósfera expulsan al exterior hidrógeno (que se pierde en el espacio) y convierten el metano en cadenas más largas de moléculas orgánicas. A esos hidrocarburos de cadena larga se les atribuye la densa bruma que oscurece la superficie del satélite en las longitudes de onda visibles.

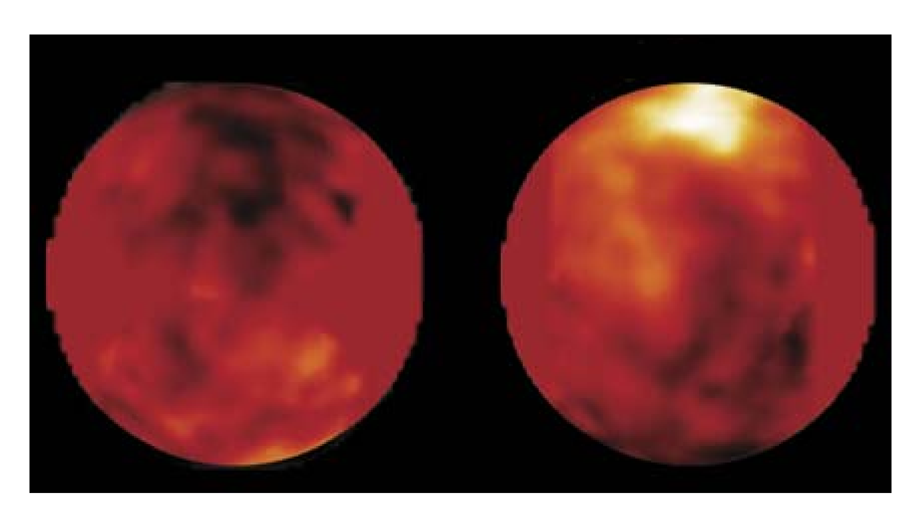
En superficie, la temperatura fluctúa alrededor de los 94 kelvin; con semejante valor, no podemos pensar en agua líquida ni en reacciones —que no fueran fotoquímicas— capaces de instar una actividad biológica, aun cuando todo indica que Titán pudo tener algo de agua en los primeros pasos de su historia. Los impactos recibidos en la época de su constitución habrían proporcionado suficiente calor (de la energía cinética del objeto) para fundir localmente el hielo. Los depósitos de agua líquida podrían haber persistido durante milenios antes de congelarse. Pero ignoramos hasta qué punto pudieron progresar las reacciones bioquímicas en un intervalo tan breve.

No cabe duda, pues, de que los componentes básicos para la aparición de la vida se han dado en el sistema solar y quizá persistan todavía allende la Tierra. En algún momento de su pasado, hasta cuatro cuerpos planetarios disfrutaron, a buen seguro, de las condiciones necesarias.

Pero faltan pruebas sobre su realidad actual. En su búsqueda se han empeñado misiones científicas de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio. La serie *Explorador de Marte*, que irá tomando cuerpo a lo largo de los diez próximos años, se propone determinar si hubo vida en Marte. La serie culminará con una misión, cuyo lanzamiento está programado para el año 2005, de recogida de rocas marcianas en regiones de posible interés biológico para su análisis. *Cassini* avanza hacia Saturno. Allí, la sonda *Huygens* penetrará en la atmósfera de Titán con una orden: averiguar la composición y química del satélite. Un radar cartografiará la superficie de Titán para recabar información geológica sobre su historia y sobre lagos u océanos de metano y etano que estén a la intemperie.

Galileo, en órbita alrededor de Júpiter, se ha concentrado en el estudio de la superficie e interior de Europa. Hay planes en curso para lanzar una misión espacial dedicada a Europa y reconstruir su historia geológica y geoquímica, que permita determinar si esconde un océano global bajo su helada corteza.

Podría suceder que, del sondeo de las entrañas del sistema solar, no aparezca prueba alguna de vida. Pero si la vida se autoconstruye a partir de ladrillos básicos con la facilidad que se le concede, tendrá que aparecer en otras partes. Su ausencia nos obligaría a replantearnos la idea del origen de la vida aquí en la Tierra.

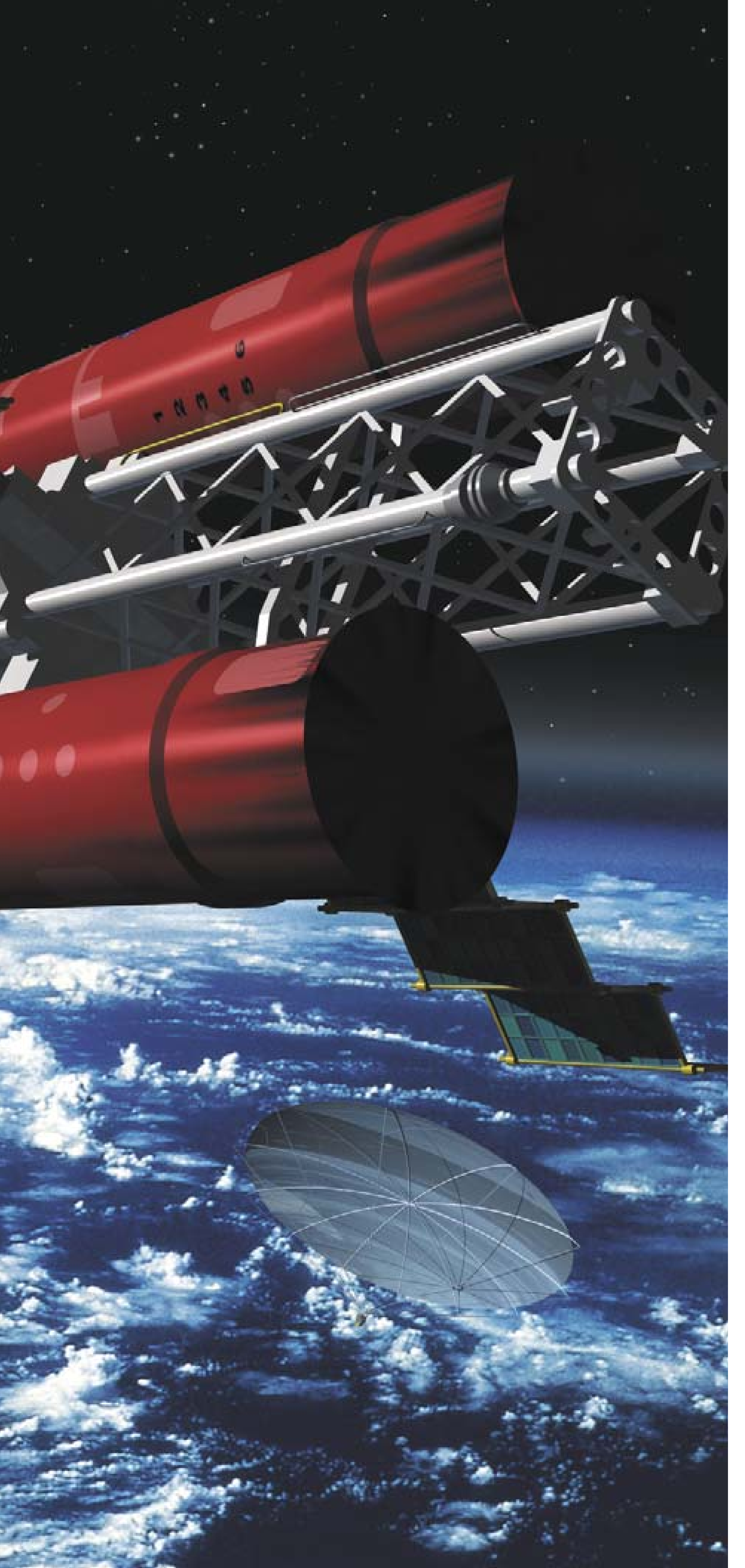




La vía de salida al espacio

Para adentrarse en el espacio profundo, el hombre tendrá que idear un modo de acceso más económico y eficaz. En este terreno no faltan propuestas

Tim Beardsley



El año 1996 marcó un hito en la historia del transporte espacial. Según una prestigiosa firma financiera, los ingresos comerciales obtenidos por el uso del espacio a escala mundial sobrepasaron, por vez primera, al total de inversiones de los gobiernos en esas materias, casi 12 billones de pesetas. Pero la expansión prosigue. En 1997 se pusieron en órbita unas 150 cargas útiles —75 de ellas de finalidad comercial—, que triplicaron la cifra del año anterior. Y ese valor se ha mantenido en 1998. Los análisis de mercado indican que los lanzamientos comerciales irán en aumento, al menos durante los próximos años: se presume que operarán 1200 satélites de comunicaciones de aquí a 2007. Se intuye una nueva quimera del oro, más frenética que la que sacudió California el siglo pasado.

Los entusiastas del espacio sueñan con el día en que la gente normal, y no sólo los astronautas, salgan de la Tierra y arriben a una estación espacial de vacaciones, a una base lunar o marciana. La Asociación de Transporte Espacial, consorcio empresarial norteamericano, acaba de crear una división dedicada a la promoción del turismo espacial, buscando el rendimiento económico más allá de nuestro planeta.

En el camino a las estrellas se alza, sin embargo, una formidable barrera: llegar a cualquier punto del espacio. El mero colocarse en órbita constituye una tarea costosa y arriesgada. Las técnicas actuales de propulsión consiguen con sumo esfuerzo enviar sondas a destinos remotos dentro del sistema solar. Las naves espaciales siguen durante varios años trayectorias indirectas que rodean varios planetas con el fin de ganar velocidad por atracción gravitatoria. Y la nave carece de energía

1. DISEÑOS DE NAVES ESPACIALES. Podrían parecerse muy poco a las sondas y aparatos que nos son familiares. Una estación de energía solar (*izquierda, arriba*) envía un haz de microondas a una nave ligera (*izquierda, abajo*) propulsada por fuerzas magnetohidrodinámicas; una lanzadera clásica (*al fondo, abajo*) ha descargado un satélite, recogido por un sistema de amarre giratorio (*derecha, arriba*). Un vehículo orbitador monofase de cohete rotatorio despliega otro satélite (*centro, abajo*). Mientras, una nave de vela ligera surca el firmamento hacia un destino remoto (*derecha, abajo*).

Vehículo Solar de Transferencia Orbital

Año aproximado de lanzamiento:	2002
Coste aproximado:	4500 millones de pesetas
Fuente de energía:	Térmica solar



2. VEHICULO SOLAR DE TRANSFERENCIA ORBITAL, proyectado por Boeing. Utiliza un gran reflector para enfocar los rayos solares sobre un bloque de grafito, que se calienta hasta 2100 grados y vaporiza el hidrógeno líquido almacenado para generar empuje. En unas semanas eleva suavemente las cargas útiles desde órbitas terrestres bajas a otras más elevadas. Este ligero vehículo sirve para lanzar satélites mediante cohetes menores que los acostumbrados.

para regresar. Pasarán siglos antes de poder enviar misiones espaciales a otros sistemas solares.

Para nuestra fortuna, no escasean los planes ingeniosos de nuevos sistemas de propulsión que logren algún día extender la presencia humana, en sentido literal o figurado, más allá de la Tierra. Algunos ofrecen radicales innovaciones sobre las técnicas existentes de cohetes o de propulsión a chorro. En otros se domestica la energía nuclear o se cabalga sobre potentes haces de láser. Se habla incluso de "ascensores espaciales" para elevar cargas hasta la órbita.

"Si logras pisar una órbita baja, has andado medio camino de cualquier punto del sistema solar", escribía en frase memorable Robert A. Heinlein, autor de ciencia ficción. Y los analistas coinciden en que el acceso económico a la órbita terrestre baja es un primer paso vital, pues casi todos los procesos contemplados para ampliar nuestro radio de acción dependen de ensamblar en órbita grandes naves espaciales u otros equipos, lo que requiere numerosos lanzamientos.

Es urgente disponer de mejores sistemas de lanzamiento. Lo exigen la empresa privada y el sector público. Las cargas útiles de uso comercial se destinan a la órbita geoestacionaria (36.000 kilómetros sobre el ecuador), donde va resultando difícil situar nuevos satélites, o a una órbita terrestre baja (a escasos centenares de kilómetros de altitud). Las órbitas bajas se están convirtiendo en una zona comercial del espacio, ya que la proximidad de los satélites a la Tierra les permite transmitir señales a receptores de sobremesa y hasta de bolsillo.

También es espectacular el auge de las aplicaciones científicas. En los diez próximos años, medio centenar largo de observatorios y naves de exploración partirán hacia otros cuerpos del sistema solar. Crecerá el ritmo de lanzamientos a medida que la NASA ponga en práctica su nuevo programa para conseguir vehículos mejores, más rápidos y más económicos. Es un hecho que las misiones científicas en proyecto cuestan sólo la tercera parte de lo que costaba una expedición típica a comienzos de los noventa. Además, durante sus quince años de esperanza de vida, la Estación Espacial Internacional no dejará de ir recibiendo nuevas tripulaciones, combustible y otros tipos de carga, amén de los 43 vuelos de ensamblaje previstos. En fecha próxima, multitud de naves de observación saldrán allende la atmósfera, desde los sigilosos satélites espía hasta los meteorológicos y las refinadas plataformas espaciales que observan cambios a escala mundial. La acuciante demanda de lanzamientos ha provocado la asociación de la división espacial comercial de Boeing con RSC-Energía de Moscú y Kvaerner Maritime de Oslo para convertir una plataforma petrolífera en rampa de lanzamiento semisumergible que desplace 34.000 toneladas y pueda remolcarse hasta lugares de lanzamiento apropiados para la puesta en órbita.

Tras el nuevo Eldorado

Hasta los más sensatos desearían ver muchas más naves espaciales en torno la Tierra o explorando los rincones más apartados del sistema solar. Hay visionario que imagina una floreciente industria basada en la explotación minera de planetas o asteroides y en la extracción de gases de su atmósfera que proporcionen energía y sostengan la vida. K. R. Sridhar, de la Universidad de Arizona, imitando al pionero que "vive de la tierra", ha desarrollado una célula electroquímica capaz de generar oxígeno a partir de la atmósfera marciana.

El afán por viajar al espacio no parece arredrarse ante el altísimo coste que implica el desplazamiento. Los cohetes enviados al espacio por distintos países vienen a costar unos tres millones de pesetas por kilogramo puesto en órbita terrestre baja. La lanzadera espacial, que ahora explota privadamente United Space Alliance —asociación de Boeing y Lockheed Martin—, estaba destinada a paseos espaciales económicos, pero su coste no ha resultado inferior al de los cohetes desechables. En cualquier caso, desde el desastre del *Challenger* en 1986 la lanzadera se ha retirado del uso comercial; si

hoy se acondicionara para un vuelo con 50 pasajeros, cada individuo tendría que pagar 1200 millones de pesetas para que el operador cubriera gastos.

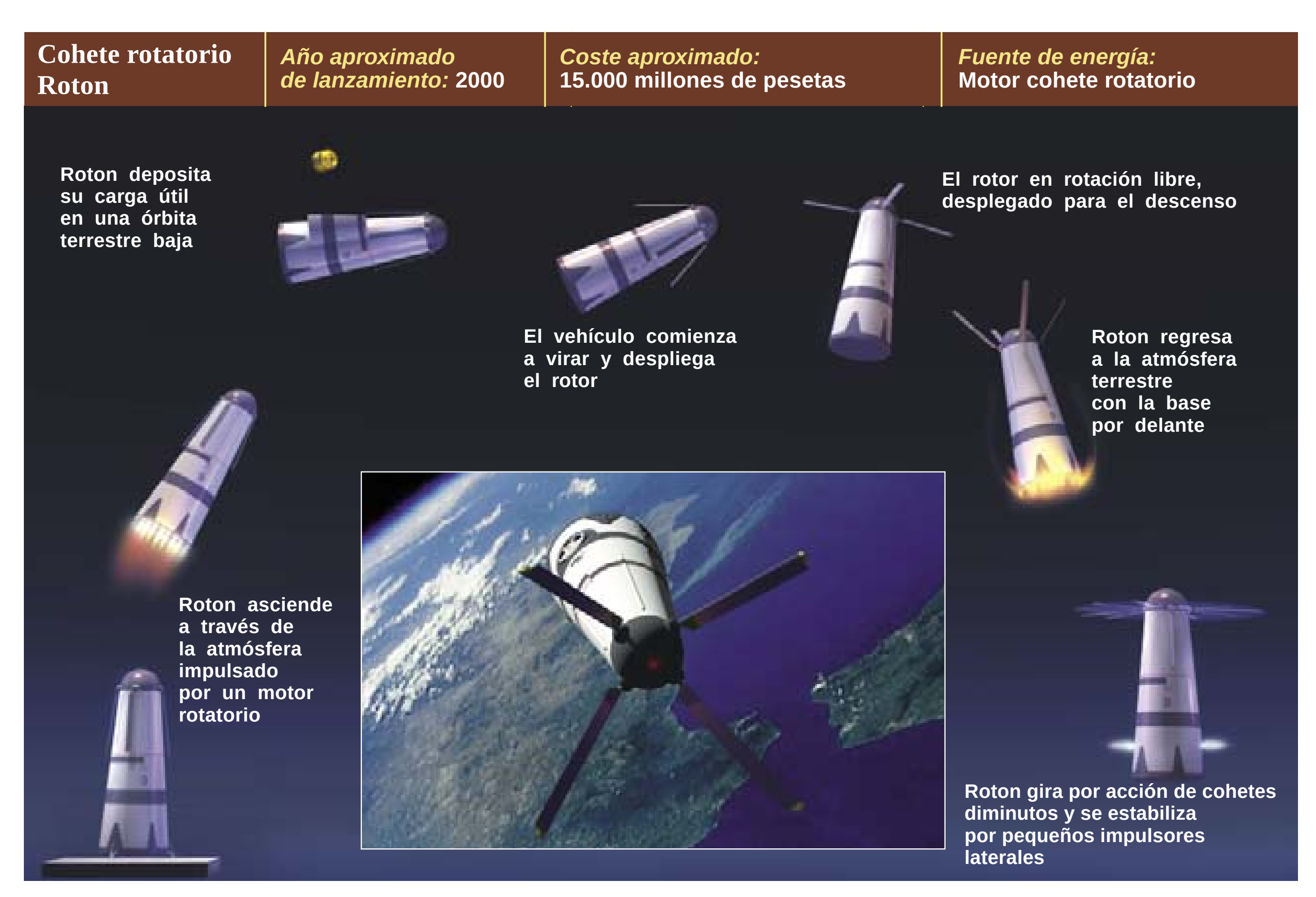
Salir al espacio es muy caro porque los propulsores han de transportar el agente oxidante y el combustible para su breve excursión, y luego (salvo la lanzadera, reutilizable en parte) se abandonan y arden en la atmósfera tras unos minutos de gloria. Desde hace tiempo se confía en rebajar drásticamente los costes del lanzamiento mediante el empleo de vehículos reutilizables que, de un vuelo a otro, sólo necesiten reponer combustible y someterse a una revisión rutinaria, igual que los aviones comerciales. En los últimos años ha aparecido un dinámico grupo de empresas, muchas de ellas integradas por ex directivos de la NASA, que han fijado su meta en reducir los costes de lanzamiento. Por lo común se proponen acomodar la técnica existente para que el lanzamiento de pequeñas cargas útiles a órbitas bajas revista interés comercial.

Nadie debería subestimar el riesgo de fabricar cohetes, incluso sin innovar los diseños. El primer gran cohete propulsor de desarrollo privado en muchos años, el Delta 3 de Boeing, explotó a poco de elevarse sobre Cabo Cañaveral en agosto de 1998, desbaratando los planes de la Boeing. Dos semanas antes había estallado un Martin Titan 4A de la Fuerza Aérea de EE.UU. y Lockheed, y la Arianespace europea sufrió el costoso fallo de un nuevo lanzador en 1996. En los EE.UU., los desajustes entre costes y demanda han provocado en el último decenio la cancelación de varios programas oficiales de desarrollo de nuevos cohetes.

El Cid cabalga de nuevo

Pero los empresarios no se amilanan. Uno de los tiburones de nueva horma es Kistler Aerospace, que fabrica los dos primeros de los cinco lanzadores proyectados con motores de procedencia rusa. La primera fase del vehículo deberá volver al lugar de lanzamiento; la segunda orbitará la Tierra antes de regresar. Ambas descenderán en paracaídas y se posarán sobre colchones de aire hinchables. La empresa ha reunido ya más de 60.000 millones de pesetas y busca muchos más para iniciar los vuelos este mismo año, pese a las tormentas financieras. También privada es la Beal Aerospace Technologies, que desarrolla un lanzador de tres fases programado para volar en el tercer trimestre del 2000; más tarde podría construirse una versión reutilizable de este cohete propulsor.

Varias firmas se plantean las ventajas de utilizar el oxígeno atmosférico, reduciendo así la cantidad de ese elemento que han de transportar los cohetes. No encierra especial dificultad si se trata de aparatos que despeguen y aterricen horizontalmente. Pioneer Rocketplane prepara un modelo ligero biplaza, propulsado por un motor de cohete y a la vez por motores turborreactores normales. La aeronave, provista de una carga útil y de una segunda fase anexa a manera de pequeña lanzadera, despega desde una pista con sus turborreactores y



3. VEHICULO ROTON construido por Rotary Rocket. Despega en vertical, propulsado por un ligero motor rotatorio de cohete. Tras colocar la carga útil en órbita terrestre baja, la nave vira y despliega palas de helicóptero. Regresa a la atmósfera con la base por delante. Las palas giran pasivamente al principio, pero luego son accionadas por pequeños cohetes de las extremidades para el aterrizaje vertical.

asciende hasta 6100 metros. Allá se encuentra con una nave cisterna que le abastece con 64.000 kilogramos de oxígeno líquido. Tras separarse ambas naves, se utiliza el oxígeno para encender el motor menor del cohete y llevarlo a velocidad Mach 15 hasta 113 kilómetros de altitud, en cuyo punto puede desprenderse de su carga útil y de la segunda fase. Según Charles J. Lauer, el *quid* estriba en conseguir un mecanismo a prueba de fallos para la transferencia del oxígeno criogénico.

También Kelly Space and Technology está preparando un avión de despegue horizontal para lanzamiento de satélites, capaz de transportar cargas de hasta 32.000 kilogramos. Astroliner, nombre de esta suerte de lanzadera en pequeño, ha de ser

Aerorreactores

Charles R. McClinton

Desde hace años los ingenieros sueñan con construir una aeronave que alcance velocidades hipersónicas, por encima de Mach 5, cinco veces la velocidad del sonido. Propulsada por un tipo especial de aerorreactores, una aeronave hipersónica de altas prestaciones podría “volar” incluso en órbita terrestre, posibilidad con la que se especuló hace ya más de cuarenta años. Pero sólo con el perfeccionamiento técnico y la demanda de sistemas de propulsión más eficaces para la inyección de cargas útiles en órbitas bajas ha comenzado a considerarse el uso de tales sistemas para acceder al espacio.

Los aerorreactores tienen ciertas ventajas sobre los motores cohete. Al consumir oxígeno atmosférico, precisan transportar menos propulsantes (sólo el combustible, no el oxidante), lo que significa vehículos lanzadores más livianos, menores y más baratos. Así, los aerorreactores producen el mismo empuje con menos de un séptimo del propulsante que requiere un cohete. Añádase que las aeronaves equipadas con aerorreactores dependen de las fuerzas aerodinámicas más que del empuje de los cohetes; por eso, su maniobrabilidad es mayor, lo que redunda en una mayor seguridad: en caso de tener que abortar el vuelo, la aeronave puede volver a tierra planeando. Las misiones ganan en flexibilidad.

La técnica de los aerorreactores para uso en vehículos lanzadores está todavía inmadura en comparación con la de los motores tipo cohete, que ha experimentado una continua evolución durante los últimos cuarenta años, incorporando incesantes mejoras y refinamientos. Pero la propulsión mediante aerorreactores hipersónicos está ya alcanzando su mayoría de edad.

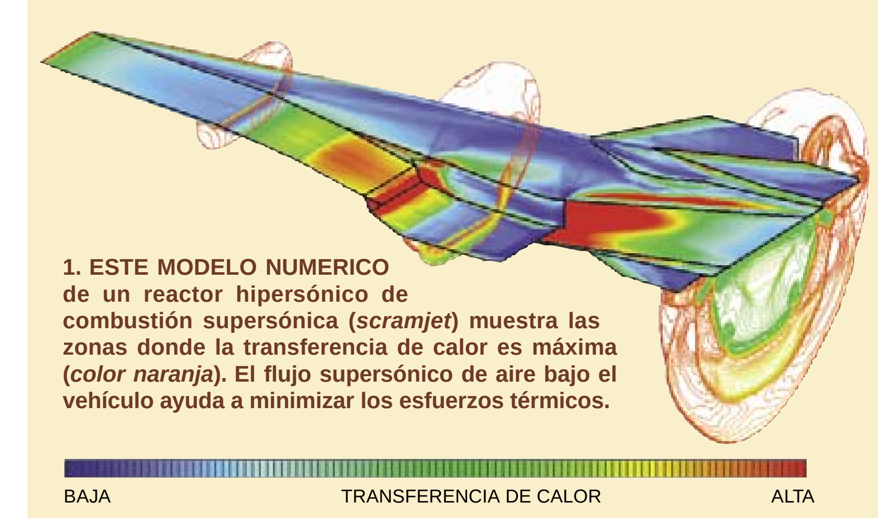
Los aerorreactores —cuyo funcionamiento se basa en la compresión del aire atmosférico, la mezcla de éste con el combustible, la combustión de la mezcla resultante y la expansión de los productos de la combustión para generar el empuje— no constituyen nada desconocido. Pero los aerorreactores habituales, que equipan a aeronaves comerciales y a aviones militares, están limitados a velocidades de Mach 3 o 4, a lo sumo, por encima de las cuales el rotor y los álabes del compresor sufren daños debido a las altas temperaturas asociadas al régimen hipersónico.

Para nuestra fortuna, a velocidades hipersónicas se puede prescindir del compresor si se diseña el motor de forma que el aire que entra en el mismo se comprima aerodinámicamente. Para ello, se busca que la geometría de la toma de aire permita que la fracción de éste capturada decelere y se comprima conforme el vehículo avanza a alta velocidad en la atmósfera. Ahora bien, los aerorreactores hipersónicos (*ramjets*) no funcionan a menos que la aeronave se desplace a altas velocidades; por eso, suelen estar integrados en aerorreactores normales. Así ocurre con Griffon II, un avión experimental francés que alcanzó una velocidad récord de 1640 kilómetros por hora en 1959. Se han combinado con motores tipo cohete en misiles tierra-aire y aire-tierra. Pero los aerorreactores hipersónicos tienen también un límite superior, Mach 6, por encima del cual las temperaturas en la cámara de combustión son tan altas, que los productos de la combustión (agua) se descomponen.

Para obtener velocidades todavía más elevadas, en los aerorreactores hipersónicos de combustión supersónica (*scramjets: supersonic-combustion ramjets*) se reduce la compresión del aire en la toma y así la corriente no se decelera tanto. Como el flujo de aire permanece supersónico, la temperatura no aumenta igual que en los aerorreactores hipersónicos de combustión subsónica (*ramjets*). El combustible se inyecta en el flujo supersónico; mezcla y combustión se producen en menos de una milésima de segundo. Todavía está por determinar el límite de este tipo de propulsión mediante combustión supersónica, aunque en teoría se le coloca por encima del rango de valores preciso para alcanzar la velocidad de satelización (Mach 20 o 25). A estas velocidades extremas, sin embargo, es probable que las ventajas de los aerorreactores de combustión supersónica frente a los motores cohete sean pequeñas, cuando no discutibles, habida cuenta de las fortísimas tensiones estructurales que se producirían.

Los aerorreactores hipersónicos pueden operar con diversos combustibles, incluidos el hidrógeno y los hidrocarburos. El hidrógeno líquido, empleado en la lanzadera espacial, constituye la elección idónea para los transbordadores; antes de quemarse sirve para refrigerar motores y vehículo. De los hidrocarburos no podemos extraer el mismo rendimiento; su uso está restringido a velocidades por debajo de Mach 8.

En el caso de una aeronave equipada con aerorreactores de combustión supersónica (*scramjets*), proyectada para captar una enorme cantidad de aire, la distinción entre motor y vehículo es difusa. La corriente, desviada principalmente en la parte inferior de la aeronave, origina un aumento de la presión del aire desviado. El cambio es lo suficientemente intenso



1. ESTE MODELO NUMERICO de un reactor hipersónico de combustión supersónica (*scramjet*) muestra las zonas donde la transferencia de calor es máxima (*color naranja*). El flujo supersónico de aire bajo el vehículo ayuda a minimizar los esfuerzos térmicos.

elevada hasta los 6100 metros. Allí, se comprobarán sus motores de cohete y se decidirá saltar hasta los 122.000 metros o regresar al lugar de lanzamiento. Los dos primeros vehículos valdrán cerca de 75.000 millones de pesetas.

Otras empresas corren mayores riesgos técnicos. Por ejemplo, Rotary Rocket, que construye una nave cohete tripulada de despegue y aterrizaje vertical. La mayor innovación del diseño radica en el motor, llamado Roton. El oxidante y el combustible se inyectan en 96 quemadores dispuestos en el interior de un disco horizontal de siete metros de diámetro, que gira a 720 revoluciones por minuto antes del despegue. La fuerza centrífuga proporciona la potencia necesaria para la combustión, lo que evita disponer

como para que se produzca una discontinuidad en la presión, una onda de choque, que se origina en el morro de la nave y se propaga en la atmósfera. Gran parte del aire comprimido entre la parte inferior de la aeronave y la onda de choque se encauza hacia el motor. El aire se calienta conforme decelera y a medida que se quema el combustible en la cámara de combustión. Los productos de la combustión sufren una expansión al pasar primero por una tobera interior y después por una exterior, generando el empuje requerido. Además, las altas presiones existentes en la parte inferior del vehículo aportan sustentación.

Para ampliar el intervalo de operación de los aeroreactores hipersónicos se han diseñado vehículos que pueden funcionar en modo de combustión subsónica (*ram*) o supersónica (*scram*). Para conseguir esta forma de operación dual pueden construirse cámaras de combustión de geometría variable o repartir el flujo de combustible entre inyectores dispuestos en distintas posiciones.

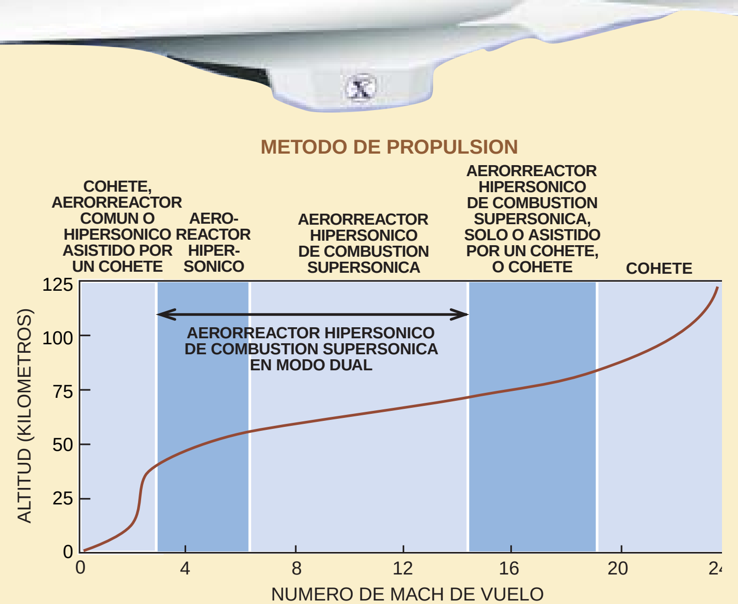
Ningún aerorreactor hipersónico, sea de combustión subsónica o supersónica, funciona bien a baja velocidad, por debajo de Mach 2 o 3. El vehículo necesita, pues, de un tercer tipo de propulsión para el despegue (quizás un aerorreactor común o un motor cohete). Los llamados motores de ciclo combinado con motor cohete, que podrían emplearse en vehículos espaciales, disponen de un motor cohete integrado en la cámara de combustión del aeroreactor que suministra el empuje necesario para el despegue, el vuelo en régimen subsónico, en régimen supersónico bajo y en régimen supersónico alto. Tras pasar por la etapa hipersónica de combustión subsónica (*ramjet*) se activa el modo de combustión supersónica (*scramjet*), hasta que se alcanzan velocidades del orden de Mach 10 o 12, momento en que se vuelve a utilizar el motor cohete para complementar el empuje proporcionado por el aerorreactor hipersónico. A números de Mach próximos a 18, el motor cohete asume la tarea de propulsar al vehículo hasta la órbita y de suministrarle capacidad de maniobra en el espacio. Algunas variantes del sistema descrito están en fase de pruebas en la NASA.

Sin embargo, aún queda mucho trabajo por hacer para validar estos sistemas de propulsión mediante aerorreactores de combustión supersónica. El empleo de métodos numéricos avanzados para resolver los problemas de mecánica de fluidos que aparecen y el uso de elaboradas herramientas de ingeniería han hecho posible el desarrollo de un vehículo lanzador que integra en su estructura un aerorreactor hipersónico. Otros retos técnicos aguardan: desarrollo de materiales ligeros resistentes a altas temperaturas, mejorar la rapidez y el rendimiento de los procesos de mezclado y combustión, y minimizar las fuentes de calor indeseadas.

En los años setenta, en el Centro Langley de Investigación, se demostró la viabilidad técnica de los aerorreactores hipersónicos mediante ensayos en túnel aerodinámico de modelos de vehículos hipersónicos. También se han hecho ensayos en tierra de prototipos de aerorreactores hipersónicos en otros lugares de EE.UU. así como en Inglaterra, Francia, Alemania, Rusia, Japón y Australia, y están en marcha líneas de investigación afines en China, Italia e India. Ya no resulta extraordinario hacer ensayos en tierra con aerorreactores hipersónicos a velocidades simuladas de hasta Mach 15; los rusos han demostrado con ensayos en vuelo el funcionamiento dual de aerorreactores hipersónicos de combustión supersónica hasta velocidades de Mach 6,4.

Pero ningún vehículo ha volado propulsado por un aeroreactor hipersónico de combustión supersónica, aunque esta última prueba es ya casi una realidad. A través del programa Hyper-X, la NASA está construyendo el X-43A, una aeronave de 3,6 metros de longitud cuya finalidad es demostrar, en los tres próximos años, la viabilidad del vuelo a Mach 7 y a Mach 10 empleando el modo de propulsión descrito. Si todo marcha bien, los ensayos allanarán el camino hacia futuros usos de los aerorreactores hipersónicos, quizás hacia la construcción de un vehículo proyectado para el vuelo hipersónico espacial.

CHARLES R. McCLINTON es director del programa Hyper-X.



2. LOS REACTORES HIPERSONICOS de combustión supersónica (*arriba*) se diseñan para que capten grandes cantidades de aire y quemarlo con hidrógeno líquido. Estos aerorreactores podrían ir combinados con cohetes (*gráfico*) en un vehículo que podría volar hasta el espacio.

de turbobombas voluminosas y caras, a la vez que permite que la fase única del vehículo recorra su camino hacia la órbita. Para descender, el Roton se sirve de palas de helicóptero desplegables que giran impulsadas por cohetes diminutos situados en su extremidad. La compañía afirma que podrá colocar cargas útiles en órbita baja por la décima parte del precio de lanzamiento actual. Su primer vuelo orbital está programado para el año que viene; los quemadores ya se han sometido a ensayo uno por uno. Pronto habrán de empezar los vuelos atmosféricos. El diseño "ha arrostrado multitud de retos", opina Mark R. Oderman, que ha supervisado las nuevas técnicas de propulsión por cohetes; el Roton presenta, opina, numerosas características "que implican altos niveles de riesgo técnico o económico".

Space Access diseña una nave diferente, no menos osada. Un pesado

Cables espaciales

Robert L. Forward y Robert P. Hoyt

Cuando la humanidad comience a colonizar la Luna y los planetas, quizá no utilice la técnica de cohetes actual. Los viajes espaciales y las colonias extraterrestres podrían depender de una técnica más antigua que la historia escrita: las cuerdas.

¿Cómo propulsar objetos en el espacio con una simple cuerda? Consideremos dos opciones alternativas. En la primera, un cable grueso que une dos satélites permite que uno de ellos lance al otro a una órbita diferente, a manera de piedra arrojada con honda de pastor. Esta idea se aplica al transporte de cargas útiles hacia la Luna y más allá. En la segunda alternativa, si la cuerda es un cable conductor, la electricidad que circula por el cable interaccionará con el campo magnético terrestre para generar fuerzas propulsivas. La gran ventaja de ambos tipos de cables espaciales, el de transferencia de cantidad de movimiento y el electrodinámico, estriba en el bajo coste de operación. En vez de consumir ingentes cantidades de combustible, los cables detraen algo de la cantidad de movimiento de un objeto que ya está en órbita o utilizan la energía suministrada por los paneles solares.

Ha habido 17 misiones relacionadas con cables espaciales. Aunque la mayoría han resultado un éxito, en el público calaron más las noticias de dos fracasos. En 1992 un satélite construido por la Agencia Espacial Italiana (ASI) debía haberse desplegado desde el transbordador *Atlantis*, para que, una vez soltado, persistieran unidos mediante un cable de cobre, largo y recubierto de aislante. El experimento se abortó durante la fase de despliegue debido a un fallo del mecanismo de extensión del cable.

Cuatro años más tarde, la NASA lo volvió a intentar. En esta misión, cuando el cable de 20 kilómetros se desplegaba casi del todo, el movimiento del transbordador espacial en el seno del campo magnético terrestre creó una diferencia de potencial eléctrico de 3500 volts. Los dispositivos electrónicos del transbordador y el satélite italiano cerraron el circuito a través de la ionosfera terrestre, permitiendo el paso por el cable de corrientes eléctricas con intensidades del orden del ampère. El experimento demostró que estos



ENVIO DE CARGAS UTILES a la Luna con un sistema de tres cables espaciales. La carga, lanzada desde la Tierra, es recogida por un cable en órbita baja terrestre (*véase el esquema superior*). Este primer cable giratorio entrega la carga a otro cable giratorio que está en una órbita alta (*1*). Como si fuera un pastor que lanza una piedra con su honda, el segundo cable catapulta la carga (*2*) hacia la Luna (*3*), donde la atrapa un tercer cable en órbita lunar (*4*). Este tercer cable giratorio deposita finalmente la carga sobre la superficie de la Luna (*5*).

avión espacial que despegará y aterrizará horizontalmente, propulsado por un motor de diseño exclusivo llamado aerorreactor hipersónico de eyección. Este novedoso motor, ya probado en tierra, lanzará la nave desde el reposo hasta Mach 6, superando toda prestación actual: su rendimiento decuplicará el de los motores existentes.

Al alcanzar Mach 6, la nave encenderá dos cohetes alimentados por hidrógeno líquido. Al poco, en Mach 9, su morro se abrirá cual fauces de cocodrilo para liberar la segunda y la tercera fase más la carga útil. Todas las fases van provistas de alas y podrán regresar, aterrizando horizontalmente en la pista de lanzamiento. El avión de Space Access llevará cargas de unos 14.000 kilogramos, lo que viene a transportar la lanzadera espacial. Se pretende que el servicio comercial comience en el 2003.

cables electrodinámicos pueden convertir cantidad de movimiento del transbordador en varios kilowatts de energía eléctrica, y al revés.

Por culpa de un defecto en el aislamiento eléctrico se formó un arco eléctrico de alta energía entre el mástil de despliegue y el cable, que se fundió. Aunque la rotura del cable obligó a cancelar la etapa electrodinámica del experimento, dio lugar a un experimento no programado de transferencia de cantidad de movimiento espectacular. En el momento de la rotura, el satélite italiano se movía en una órbita a 20 kilómetros por encima del transbordador, arrastrado por éste a una velocidad mayor que la correspondiente a la órbita que ocupaba. En consecuencia, al partirse el cable, el exceso de cantidad de movimiento hizo que el satélite ganara en altitud, hasta siete veces la longitud del cable, y se situara finalmente en una órbita a 140 kilómetros por encima del transbordador.

Otro experimento feliz se desarrolló en 1993, al someter a prueba una idea propuesta por Joseph A. Carroll, de Tether Applications en San Diego. Desde un satélite grande se desplegó, en dirección a la Tierra, una carga útil unida a un cable de 20 kilómetros. Al ser la velocidad de esta carga menor que la requerida en la órbita que ocupaba, el corte del cable en el momento apropiado hizo que la carga descendiera hacia un punto predeterminado de la superficie terrestre. En Tether Applications estamos desarrollando una cápsula de reentrada basada en un cable espacial que podría utilizarse desde la Estación Espacial Internacional para despachar envíos urgentes hacia la Tierra, como cargas científicas que no puedan esperar a la siguiente visita del transbordador espacial.

En 1994, una misión de características semejantes dejó una carga útil al final de un cable de 20 kilómetros para averiguar cuánto tiempo podía sobrevivir esta conexión —un cable del grosor del hilo de una cometa— a los impactos de los micrometeoritos y de la basura espacial. La vida útil estimada del cable, que podía partirse por el impacto de una partícula del tamaño de un grano de arena, era de apenas 12 días, pero la rotura se produjo a los cuatro.

Este experimento puso de manifiesto la necesidad de fabricar cables espaciales con muchos hilos y dispuestos de suerte que una misma partícula no pudiera cortarlos todos de golpe; si uno falla los demás podrían absorber la carga que aguantaba el primero. Con esta idea, en mente, el NRL (Laboratorio de Investigación Naval) y la Oficina nacional de Reconocimiento (NRO) estadounidenses han fabricado un cordón hueco de 2,5 mm de diámetro de fibra Spectra (un polímero de alta resistencia utilizado en artes de pesca) e hilo. En junio de 1996 se pusieron en órbita dos satélites unidos por un cable de este tipo, de 4 kilómetros de longitud; lleva casi tres años en órbita sin sufrir corte alguno.

A continuación de ese experimento, en octubre del año pasado el NRL y el NRO sometieron a prueba un cable con un diseño diferente: una cinta de plástico muy fina y de 3 cm de ancho, reforzada con fibras de alta resistencia en la dirección longitudinal. Este cable, de 6 kilómetros de longitud, puede sobrevivir durante muchos años en el espacio, pero la cinta determina que sea pesado. Nuestra compañía, Tether Unlimited, colabora con Culzean Fabrics y Flemings Textiles para fabricar cables multihilos con una configuración abierta, semejante a una red de pesca, que pesará menos y que debería durar largos decenios en un entorno espacial.

Hay más ensayos programados. Para el año que viene, la compañía Michigan Technic pretende lanzar desde el transbordador espacial dos cargas de material científico unidas por un cable de dos kilómetros.

El Centro Marshall de Vuelos Espaciales, de la NASA, investiga la utilización de los cables electrodinámicos para la propulsión espacial sin combustible. En una misión prevista para mediados del 2000, comprobará si un cable conductor puede disminuir la altitud de la última etapa de un lanzador Delta 2. En Tether Unlimited andamos preparando un equipo capaz de unirse a satélites o terceras etapas de cohetes antes del lanzamiento; luego, cuando el vehículo terminara su misión o sufriera alguna avería, permitiría desplegar un cable conductor que, por reacción con el campo magnético de la Tierra, haría que el vehículo perdiera altitud rápidamente hasta arder al entrar en la alta atmósfera. Tenemos previsto someter a prueba nuestro aparato a finales del 2000 en la tercera etapa de un cohete construido por la empresa rusa Lavochkin Association.

En la NASA se estudia el recurso a cables electrodinámicos para la propulsión hacia órbitas de mayor altitud. En semejante configuración, los paneles solares crearían una corriente eléctrica en el cable, cuya interacción con el campo magnético terrestre provocaría una fuerza neta capaz de arrastrar y elevar cualquier carga en órbita alrededor de la Tierra. Podríamos basarnos en ese enfoque para mantener a la Estación Espacial Internacional en su órbita sin gasto de combustible.

¿Qué futuro se le adivina a los cables? Hemos analizado la viabilidad de enviar cargas útiles a la Luna e incluso más lejos mediante un sistema de cables de centenares de kilómetros de longitud, en rápida rotación. La idea es muy simple. En primer lugar, un cable en órbita terrestre baja iza la carga desde una lanzadera reutilizable; le pasa la carga a otro cable situado en una órbita elíptica de mayor altitud. El segundo cable impulsa al objeto hacia la Luna, donde es capturado por un tercer cable en órbita alrededor de nuestro satélite (Lunavator).

El Lunavator estaría girando alrededor de la Luna a la velocidad adecuada. Tras recoger la carga, la depositaría suavemente sobre la superficie lunar media órbita después. Simultáneamente el cable podría atrapar una carga de retorno. Si la cantidad de masa enviada y recogida estuviera equilibrada, el sistema no necesitaría combustible y podría convertirse en una suerte de autopista hacia la Luna que haría de los viajes a nuestro satélite un fenómeno cotidiano.

Obviamente hay muchos desafíos técnicos por vencer antes de que un sistema como el descrito sea una realidad, pero su potencialidad para hacer accesible una forma económica de viajar por el espacio es enorme. Quizás algún día habrá numerosos cables giratorios alrededor de los planetas y de sus satélites, guiando el ajetreo del comercio interplanetario. Y todo habrá empezado con un simple trozo de cuerda.

ROBERT L. FORWARD y ROBERT P. HOYT son los fundadores de Tether Unlimited. Esta compañía aeroespacial se ha especializado en sistemas de cables para aplicaciones comerciales.

El más importante vehículo lanzador en desarrollo, el X-33, se está construyendo en la factoría Skunk de Lockheed Martin, en el marco de un convenio firmado por la NASA y la industria del sector para reducir a la décima parte los costes del lanzamiento. El X-33 es una nave experimental, reducida a la mitad de tamaño, destinada a probar un motor de cohete lineal en punta de lanza y otras técnicas. En teoría, con una sola fase de motores de ese tipo que se adapten automáticamente a las variaciones de presión atmosférica se puede propulsar un vehículo de despegue vertical, enteramente reutilizable, hasta alcanzar la órbita. Pero el X-33, que por sí mismo no llegará a la órbita, está forzando los límites

Autopistas de luz

Leik N. Myrabo

Las naves espaciales transportan su propia fuente de energía. El coste de los viajes se reduciría drásticamente si no hubiera que cargar componentes pesados y combustible y se dirigiese un haz de luz de láser de alta intensidad o energía de microondas hacia los vehículos. Los experimentos financiados por la NASA y el Ejército norteamericano del Aire han mostrado una nave de luz, que se mueve mediante un haz pulsante de láser infrarojo dirigido desde el suelo. Las superficies reflectantes de que dispone la nave enfocan el haz en un anillo, donde calienta el aire hasta una temperatura casi cinco veces mayor que la existente en la superficie del Sol, lo que produce que el aire se expanda de forma explosiva y produzca el empuje.

Mediante un láser de dióxido de carbono de 10 kilowatts a 28 pulsos por segundo, Franklin B. Mead y yo hemos propulsado una nave de luz en miniatura estabilizada por rotación con un diámetro de 10 a 15 centímetros hasta una altitud de 30 metros en unos tres segundos. Disponemos de financiación para aumentar la potencia del láser hasta 100 kilowatts, lo que permitirá vuelos a una altitud de 30 kilómetros. Aunque los modelos actuales pesan menos de 50 gramos, nos proponemos, antes de cinco años, acelerar un microsatélite de un kilogramo hasta una órbita terrestre baja empleando desde tierra un láser de un megawatt construido específicamente.

Los vehículos de demostración de naves de luz están fabricados en aluminio de calidad aeronáutica. Constan de un armazón aéreo delantero, o cubierta, un sombrerete anular y una parte posterior, formada por una tobera óptica y de expansión. Durante el vuelo atmosférico, la sección delantera comprime el aire y lo dirige hacia la entrada del motor. El sombrerete anular absorbe la mayor parte del impulso. La sección trasera sirve de espejo colector parabólico que concentra la luz infrarroja del láser en un foco anular, mientras proporciona otra superficie contra la que puede presionar el chorro de aire caliente. Porta un sistema automático de dirección: si la nave comienza a moverse hacia el exterior del haz, el empuje se inclina y la obliga a recuperar su posición.

Una nave de luz de un kilogramo se acelerará hasta Mach 5 y alcanzará una altitud de 30 kilómetros. A continuación, se propulsará con el hidrógeno líquido cargado a bordo, ya que el aire se vuelve escaso, bastando un kilogramo de hidrógeno para llevar la nave hasta su órbita. Una versión de 1,4 metros de diámetro podría poner en órbita microsatélites de hasta 100 kilogramos moviéndose en un haz de láser de 100 megawatts. Por ser pulsantes los haces que usamos, la potencia podría alcanzarse sin especial dificultad combinando la salida de un grupo de láseres. Estos podrían lanzar satélites de comunicaciones y hacer que abandonen su órbita cuando su electrónica quede envejecida.



1. VEHICULO DE DEMOSTRACION en miniatura de nave de luz, que ya ha volado en pruebas hasta una altura de 30 metros impulsada por un láser de 10 kilowatts. Los modelos operativos deberían acelerarse y colocarse en órbita.

Naves de luz con una geometría diferente pueden moverse también hacia su fuente de energía, en lugar de alejarse de ella, o incluso hacerlo lateralmente. Estas variantes de tales vehículos se hallan capacitadas para desplazar cargas alrededor del planeta. Con microondas podrían también impulsarse las naves de luz, aunque no alcanzarían las densidades de potencia de los láseres; los vehículos tendrían que ser, pues, mayores. Pero los generadores de microondas resultan harto más baratos y fáciles de construir para potencias muy altas.

También he diseñado naves movidas por haces de radiación que funcionan según un principio diferente, aptas para transportar pasajeros. Podrían ser adecuadas para trasladar cargas mayores, ya que producirían la fuerza de empuje de un modo más rentable.

Un espejo a bordo de la nave enfoca parte de la energía del haz incidente hacia un punto situado delante del vehículo a una distancia de un diámetro de la nave. El intenso calor crea una “columna” de aire que desvía el aire existente en la trayectoria del vehículo, disminuyendo la resistencia aerodinámica y reduciendo el calentamiento del ingenio.

La nave toma parte de la energía adicional del haz para generar potentes campos eléctricos en torno a su estructura, con la consiguiente ionización del aire. Se sirve de imanes superconductores para crear intensos campos magnéticos en la zona. Cuando el aire ionizado atraviesa los campos eléctricos y magnéticos en esta configuración, entran en juego fuerzas magnetohidrodinámicas que aceleran el aire en la estela de la nave para producir empuje.

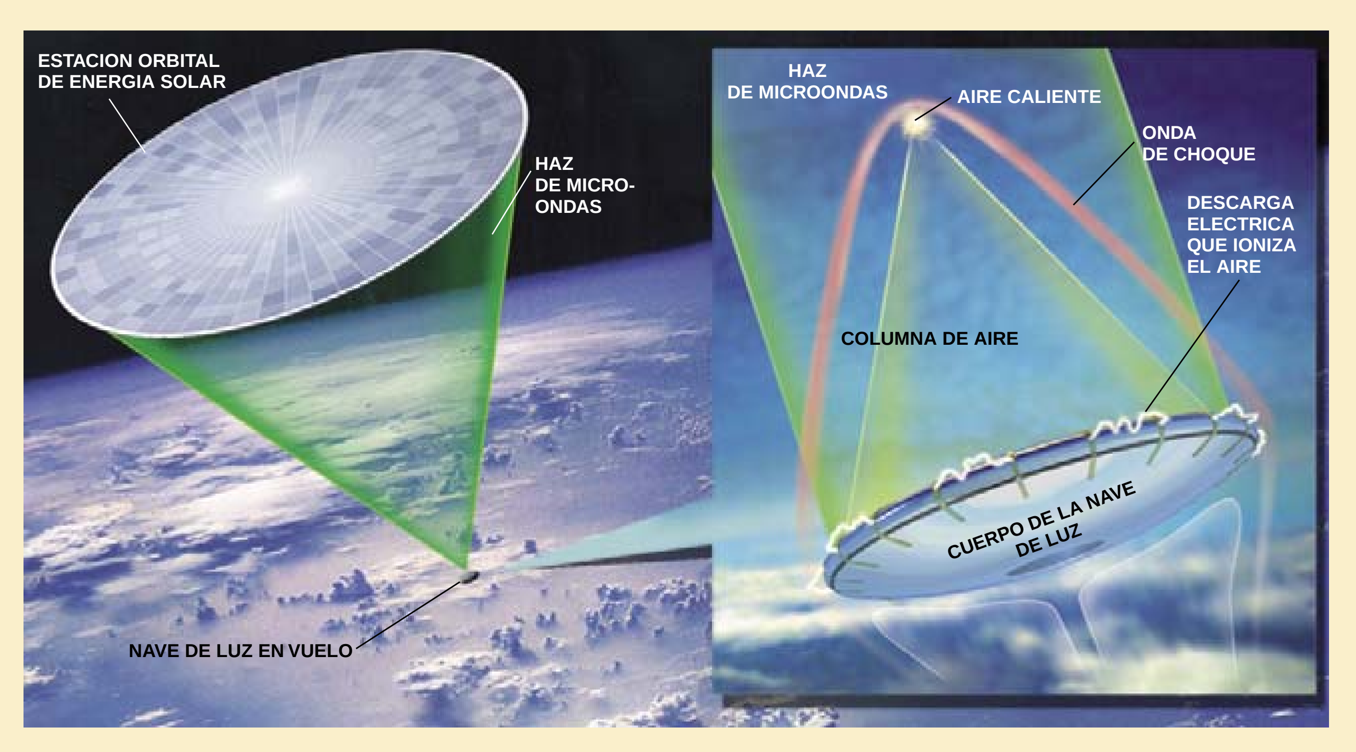
Para controlar el flujo de aire en torno al vehículo, basta modificar la cantidad de energía reflejada. En 1995 demostré la reducción de resistencia aerodinámica por una columna de aire en un túnel de choque hipersónico; me serví de un generador de plasma calentado eléctricamente, en vez de emplear potencia generada con un láser. Las pruebas encaminadas a la producción de empuje magnetohidrodinámico, con un dispositivo de 15 centímetros de diámetro, no han hecho sino comenzar. Una nave de luz, del tamaño de una persona, impulsada por microondas o por un láser pulsante de 1000 megawatts podría funcionar a altitudes de hasta 50 kilómetros y acelerarse hasta velocidades orbitales.

Las naves de luz podrían revolucionar el transporte si se impulsan desde estaciones orbitales de energía solar. Habría que rebajar, sin embargo, el coste del montaje de la infraestructura orbital a la centésima parte de lo que se invierte hoy. Colocar un kilogramo de carga útil en órbita por medio del transbordador espacial cuesta ahora unos 20.000 dólares.

Podría salvarse el escollo preparando la primera estación de energía orbital de suerte tal, que permita el

de las técnicas de construcción. Y ciertos observadores dudan de que proporcione suficiente información a la NASA como para decidir (en el año 2000, según ha prometido) si debe seguir confiando en las lanzaderas actuales allende el 2020 o, por contra, empezar a sustituirlas hacia el 2012.

El primer vuelo del X-33 se ha retrasado seis meses por dificultades en la fabricación de los motores; se producirá a finales de año. Daniel R. Mulville sostiene que se necesitarán "uno o dos años más" de desarrollo tras haber completado los ensayos en vuelo a finales del curso que viene, para poder decidir si se construye un vehículo de tamaño normal que llegue con una sola fase hasta la órbita. (Sin embargo, Lockheed Martin dice



2. ESTACION ORBITAL de energía solar (*izquierda, arriba*), que podría dirigir un haz de energía de microondas hacia una nave de luz en ascensión (*derecha*) impulsada por empuje magnetohidrodinámico. La nave de luz enfoca la energía de microondas para crear una "columna" de aire que desvía el aire que encuentra en su trayectoria. Los electrodos situados en el borde del vehículo ionizan el aire y forman parte del sistema de generación de empuje.

acceso barato al espacio. Imaginemos una estructura de un kilómetro de diámetro construida como una rueda gigante de bicicleta y orbitando a una altitud de 500 kilómetros. Su masa sería alrededor de 1010 toneladas, y rotaría lentamente para ganar estabilidad giroscópica. Además de los "radios" estructurales, la rueda tendría un disco central compuesto de 55 grandes sectores circulares de carburo de silicio, de 0,32 milímetros de espesor. Cubriendo completamente una cara con carburo de silicio, se tendría un rendimiento del 30 por ciento para células solares fotovoltaicas de película delgada, capaces de suministrar 320 megawatts de electricidad. (Se espera que estos dispositivos estén listos antes de diez años.) En la otra cara habría 13.200 millones de transmisores de estado sólido en miniatura, cada uno con un espesor de sólo 8,5 milímetros y suministrando 1,5 watts de potencia de microondas.

Los cohetes químicos podrían elevar la estructura en una serie de 55 lanzamientos con un coste de 5500 millones de dólares. La estación estaría rodeada por un anillo como dispositivo de almacenamiento de energía; constaría de dos cables superconductores, que podrían cargarse con corrientes eléctricas en contraflujo; cada cable pesaría 100 toneladas. (Esta disposición eliminaría el gigantesco par magnético que se produciría si se emplease un cable sólo.)

Durante dos órbitas a la Tierra, la estación cargaría este sistema con 1800 gigajoules de energía. Dirigiría luego un haz de 4,3 gigawatts de potencia de microondas sobre una nave de luz a una distancia de unos 1170 kilómetros. Las fuerzas de par producidas por el desplazamiento de pequeñas cantidades de corriente de un cable al otro orientarían toscamente la central de energía, pero el control fino se lograría mediante una baliza montada en la nave de luz. Enviaría una señal que coordinaría los transmisores individuales en la central de energía para crear un punto de 10 metros de diámetro en el lugar de lanzamiento. El vehículo podría alcanzar la órbita en menos de cinco minutos, sometiendo a los ocupantes a una aceleración no superior a 3 g, aproximadamente la misma que experimentan los astronautas del transbordador espacial. O bien la estación de energía solar podría descargar toda su energía en una explosión de 54 segundos que debería suministrar una aceleración vertical de ascensión de casi 20 g hasta la órbita geoestacionaria o incluso hasta la velocidad de escape.

La primera estación orbital de energía solar allanará el camino para la industria de estaciones orbitales, lanzadas y montadas desde naves de luz especializadas. Dentro de unas décadas, una flota de estas naves hará factibles viajes rápidos y baratos alrededor del globo, a la Luna e incluso más lejos.

LEIK N. MYRABO enseña física para ingenieros en el Instituto Politécnico Rensselaer.

que su modelo, llamado VentureStar, estará listo para entrega al término del 2000.) Problema: no hay autoclave en el mundo que sea capaz de limpiar el tanque de materiales compuestos del hidrógeno líquido del VentureStar. Se necesita, asimismo, perfeccionar las losetas metálicas que protegen la nave del calor de la reinserción en la atmósfera.

Marcia R. Smith reconoce que el VentureStar se ha aceptado como posible sistema nacional de lanzamiento. Sin embargo, su programa de introducción podría variar, ya que el primer vehículo no transportaría seres humanos. La NASA acaba de pedir a la industria que estudie alternativas para llevar a la órbita cargamento, humano o no, a principios del siglo que viene. Se están ensayando estrategias potencialmente útiles con un vehículo experimental menor, el X-34. En ese modelo se probarán, desde este mismo año, las técnicas de puesta en órbita en dos fases, que incorporan un nuevo tipo de losetas cerámicas reutilizables.

Con la mirada trascendiendo los modelos X-33 y X-34, la NASA ha intensificado sus trabajos en motores hipersónicos de chorro, que habían pasado a segundo término cuando se canceló el programa del avión nacional aeroespacial en noviembre del año 1994.

Velas de luz

Henry M. Harris

Una cosa es mirar los cielos y otra explorarlos. Con la técnica actual, tardaríamos decenas de miles de años en poner pie siquiera en la estrella más cercana. En 1981, por encargo de la NASA, coordiné un estudio sobre métodos de propulsión que capacitaran a un vehículo de exploración para alcanzar una estrella en 40 años, lo que dura una vida profesional. Analizamos las tres únicas propuestas que parecen plausibles: la fusión, la antimateria y la energía radiada. De ellas, sólo la energía radiada se comprende con hondura suficiente como para tomarla en consideración en un programa realista a corto plazo.

¿Por qué resulta atractiva la energía radiada? Cuando se realiza un largo viaje en coche, uno depende de las estaciones de servicio para repostar y del taller de reparaciones por si se produce una avería mecánica. Las naves espaciales actuales, por contra, tienen que transportar todo el combustible necesario y deben operar sin intervención del hombre. ¿Podría dejarse el motor en tierra, junto con el combustible? Si a ello añadimos la posibilidad de reparaciones en vuelo, la nave pesaría muchísimo menos y, por tanto, se aceleraría sin tanta dificultad.



La energía radiada podría ofrecer una solución. De acuerdo con la investigación de la ingeniería implicada, el mejor método para un vuelo espacial de larga duración sería iluminar con un potente láser óptico una “vela” grande y fina. Lo propuso, allá por 1984, Robert L. Forward. Los láseres pueden proyectar energía hasta distancias enormes; la extensión notable de la vela le permite recibir mucha energía en comparación con su masa. Otros tipos de energía radiada, como las microondas, podrían servir también. Algunos han sopesado incluso la posibilidad de irradiar una nave espacial con partículas dotadas de carga. Al llegar a la nave espacial, las partículas atravesarían una bobina magnética superconductora, creándose una fuerza de Lorentz que proporcionaría el empuje. De momento, sin embargo, la luz láser enfocada sobre velas parece que es la opción más práctica.

Cuando el fotón de un láser incide sobre una vela, pueden ocurrir dos cosas. Que se produzca un choque elástico con el campo electromagnético que envuelve a los átomos de la vela y que se refleje; o que el fotón sea absorbido por la materia de la vela, un proceso que calienta ligerísimamente la vela. Ambos procesos imparten una aceleración, aunque la reflexión comunica el doble que la absorción; por tanto, la vela más efectiva es la reflectora.

La aceleración que el láser suministra es proporcional a la fuerza que transmite a la vela e inversamente proporcional a la masa de la nave. Como cualquier otro método de propulsión, las velas de luz quedan limitadas en sus prestaciones por las propiedades térmicas y la resistencia de los materiales; también, por nuestra habilidad para elaborar estructuras escasas de masa. Los diseños de velas propuestos consisten en una delgada película de metal brillante, la mayoría con algún recubrimiento para reforzar su solidez estructural.

La potencia que se puede transmitir está limitada por el calentamiento de la vela. Conforme el metal de la superficie se calienta, la vela se torna menos reflectora. Para rebajar la temperatura que adquiere la vela, y acelerar la nave, se recubre la otra cara con materiales que sean buenos emisores de calor.

Para alcanzar velocidades muy altas, una nave debe mantener su aceleración. La velocidad máxima que se puede alcanzar con una vela de luz viene establecida por el tiempo durante el cual un láser instalado en tierra puede iluminar el objetivo eficientemente. La luz del láser posee coherencia, una propiedad gracias a la cual la energía que imparte no se ve mermada por la distancia recorrida hasta alcanzar la distancia de difracción. Más allá de este valor crítico, la potencia liberada baja hasta hacerse insignificante.

La distancia de difracción de un láser, y con ella la velocidad máxima de la nave que propulsa, está gobernada por el tamaño de la apertura del láser. Un láser muy potente se construiría probablemente a partir de cientos de láseres pequeños agrupados en gavilla. El tamaño de la apertura eficaz viene a valer el diámetro de la gavilla. La potencia máxima se transmite cuando la gavilla ha adquirido su máxima compactación. Disponemos de un diseño teselado que se aproxima a una densidad de empaquetamiento del cien por cien.

Mi equipo del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena ha estudiado la transacción de compromiso entre potencia de los láseres y tamaño de la gavilla, atendiendo al coste de la misión. El tamaño de la apertura necesaria par una misión interestelar es enorme. Una gavilla de láseres en fase que hemos diseñado para mandar una sonda en 40 años a una estrella vecina, Alfa Centauri, alcanzaría los 1000 kilómetros de diámetro. Para nuestra fortuna, las misiones planetarias requieren aperturas mucho menores. Un láser de 46 gigawatts que

El uso de variantes denominadas aerorreactores de combustión supersónica —que respiran aire como los de chorro tradicionales pero funcionan a velocidades superiores a Mach 6— podría aproximarnos a la meta de alcanzar la órbita con una sola fase. A partir del 2000, varios de estos aviones, los X-43, volarán sin tripulación a velocidades de hasta Mach 10, para estrellarse luego en el océano Pacífico.

La dificultad con la que se enfrentan estos trabajos tiene que ver, según Gary E. Payton, con el flujo de aire entrante: lograr que se proceda con lentitud suficiente para que el combustible pueda quemarse y producir empuje sin generar excesivo calor. Esto, en principio, se obtendría mediante una onda de choque creada en la admisión de aire, pero el proceso desperdicia mucha energía.

Hay una técnica de lanzamiento capaz de abrir un camino nuevo: un motor que inhala aire y funciona también como cohete, lo mismo en bajas velocidades que cuando el aire es demasiado sutil para que valga la pena aspirarlo. A esa altitud, un vehículo surcando el espacio avanzará, muy probablemente, a Mach 10. Estos motores de ciclo combinado basados en cohetes tienen todavía que pasar por ensayos en túneles aerodinámicos;

iluminara una vela de 50 metros de diámetro recubierta con una película de oro sólo necesitaría una apertura de 15 metros para enviar una carga de 10 kilogramos a Marte en 10 días. Con este ingenio se podría lanzar una sonda hasta el límite entre el viento solar y el medio interestelar en tres o cuatro años.

El diseño de aparatos con velas de luz podría acomodarse al seguimiento automático de un haz de luz; podrían guiarse, pues, desde la Tierra. Incluso se podría construir una vela dotada de un anillo exterior reflector que se desprendiera al llegar a su destino. El anillo proseguiría rumbo adelante, como antes, y retrorreflejaría la luz láser hacia la parte central separada de la vela, propulsando su retorno a casa.

Se ha realizado ya un trabajo meritorio. En el marco del programa contra misiles, el Departamento de Defensa desarrolló láseres de alta potencia, que pueden apuntar su luz con precisión, como posible arma antisatélite. Se han ensayado estructuras parecidas a las velas cuya finalidad es reflejar la luz del sol. Los rusos han lanzado el *Znamya* 2, un reflector solar rotante de 20 metros de diámetro, construido con polímeros, con la intención de suministrar iluminación suplementaria en invierno a las ciudades septentrionales del país.

En los Estados Unidos, la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera se propone enviar al espacio, de aquí a cuatro años, una nave impulsada por una vela solar. El aparato podría estacionarse en una posición orbital inestable entre la Tierra y el Sol, desde donde nos avisaría, con una hora de anticipación, de las partículas descargadas en las tormentas solares.

La NASA sopesa el desarrollo de velas de láser en sustitución de los cohetes. Las misiones que se consideran van desde una demostración de una vela de 100 metros de diámetro en órbita terrestre hasta un viaje a través de la onda de choque en la frontera de nuestro sistema planetario.

En el futuro inmediato, se podrían medir en el laboratorio las propiedades de los materiales susceptibles de emplearse en las misiones a Marte, el cinturón de Kuiper y el medio interestelar. Con un láser químico militar del White Sands Missile Range de Nuevo México, que alcanza megawatts de potencia, podrían iluminarse velas desplegadas desde naves y así verificar las aceleraciones resultantes. Y otros láseres en proyecto, con potencias de megawatts, aptos para funcionar enchufados a la red eléctrica, podrían permitir antes de cinco años impulsar las velas de luz desde una órbita hasta otra.

Con las velas de luz vislumbramos un futuro plausible, en el que se abre la perspectiva de un acceso rápido y sin gastos desmesurados a los confines del sistema solar; con el tiempo, a estrellas remotas.

Henry M. Harris estudia la exploración interestelar en el Laboratorio de Propulsión a Chorro en Pasadena. También ha diseñado experimentos de la lanzadera espacial.

APARATO CON VELA DE LUZ (*página opuesta*) impulsado desde la Tierra por un láser. Con el tiempo, podría llevar sensores a lugares remotos del sistema solar y otras estrellas. La reflectividad de la vela maximiza la velocidad. La estructura, de poca masa, podría transportar una carga ligera (*junto a estas líneas*).

Cohetes nucleares compactos

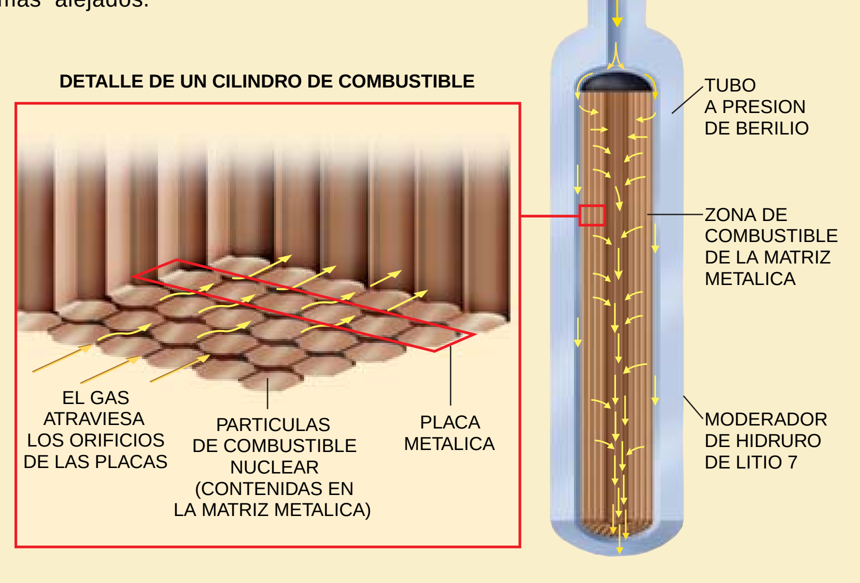
James R. Powell

Algún día la humanidad, al explorar los planetas del sistema solar, no se limitará a enviar sondas que pasan por sus cercanías a gran velocidad. Enviará astronaves que rodearán esos gigantes gaseosos, dejarán robots en sus lunas y retornarán a la Tierra con muestras de rocas y suelo. Con ulteriores avances, mandará astronautas hasta sus lunas fascinantes, donde, al menos en dos, se cree que abunda el agua (requisito esencial para la existencia de vida tal como la conocemos).

Para tales misiones se requerirán cohetes propulsados por fisión nuclear, no por combustión química. Los cohetes químicos han prestado óptimo servicio, pero la baja cantidad de energía que desarrollan por unidad de masa de combustible restringe su empleo en astronaves. Para llegar a los planetas lejanos, un vehículo espacial de propulsión química debe poseer una masa muy limitada y aprovechar la “ayuda” gravitatoria planetaria; en razón de ello, la nave maniobra en las proximidades del planeta para que el campo gravitatorio del mismo actúe a modo de honda y aumente su velocidad. De ahí que los responsables de las misiones esperen la ocurrencia de “ventanas”, breves intervalos de tiempo durante los cuales puede lanzarse una nave dirigida hacia los planetas debidamente ubicados para acelerarla en su trayecto hacia cuerpos más alejados.

Los cohetes químicos poseen un incremento máximo de velocidad limitado. Ello significa que las velocidades de sus gases de exhaustión, o velocidades de escape, no bastan para comunicarles unas velocidades muy elevadas. Los mejores cohetes químicos, los basados en la reacción entre hidrógeno y oxígeno, comunican unos incrementos máximos de velocidad del orden de 10 kilómetros por segundo a una astronave que parta de una órbita terrestre.

Los cohetes nucleares, por contra, podrían impartir un incremento máximo de velocidad de hasta unos 22 kilómetros por segundo. Ese guarismo posibilitaría un trayecto directo hasta Saturno, por ejemplo, acortando la duración del viaje de siete a tres años. Semejante cohete nuclear no entrañaría riesgo alguno, pues, contrariamente a la opinión del vulgo, un cohete nuclear no tiene por qué ser intensamente radiactivo en su lanzamiento. Esa astronave, con sus propulsores nucleares, podría lanzarse como carga útil en la cabeza de un cohete químico normal. Luego, cuando la carga útil estuviera en una órbita de gran altitud, por encima de 800 kilómetros, arrancaría el reactor nuclear.



LOS ELEMENTOS DE COMBUSTIBLE serían 37 en un cohete nuclear compacto. El hidrógeno líquido al fluir hacia su interior se gasificaría y atravesaría el cilindro de combustible nuclear (*marrón claro*). A la izquierda se muestra el detalle de cinco de las capas laminares de la matriz metálica del cilindro. El gas recalentado descendería entonces por un conducto central, proyectándose al exterior y generando así empuje.

La técnica requerida para construir un cohete propulsado por fisión nuclear no está muy lejos de nuestras posibilidades. Mis colegas y yo hemos diseñado un motor de tipo cohete nuclear compacto, Mitee, que podría construirse en un plazo de seis a ocho años por un costo de entre seiscientos y ochocientos millones de dólares, cifra modesta en el ámbito aerospacial. Además, el coste del desarrollo del motor quedaría compensado con las economías de lanzamientos ulteriores. La astronave con motor nuclear no necesitaría acarrear una cuantía enorme de propulsante químico, lo que supone que el lanzamiento ya no requeriría un vehículo Titán IV, que cuesta de 250 a 325 millones de dólares. Antes bien, podría emplearse un cohete de bajo precio, así un Delta o un Atlas, que están en la gama de los 50 a 150 millones de dólares.

En nuestro proyecto, el combustible nuclear residiría en placas metálicas perforadas en un cilindro anular, con una configuración similar a un rollo de jalea con el centro hueco. En el exterior del cilindro, una camisa de hidruro de litio 7 actuaría de moderador, reduciendo la velocidad de los neutrones emitidos en la fisión nuclear desarrollada en el combustible. El refrigerante (hidrógeno líquido) fluiría desde el exterior del cilindro hacia dentro, gasificándose rápidamente al calentarse y correr hacia el centro. El gas recalentado, a unos 2700 grados centígrados, fluiría raudo por un conducto coincidente con el eje geométrico del cilindro para salir por una pequeña boquilla situada en el extremo.

A favor de la propulsión nuclear está la abundancia de propulsante (hidrógeno), que en forma gaseosa hallamos en los planetas gigantes de los confines del sistema solar y en el agua helada de las lunas y planetas remotos. Por tanto, como el combustible nuclear duraría bastante, un ingenio de propulsión nuclear podría, en teoría, viajar por los confines del sistema solar durante 10 o 15 años, reabasteciéndose de hidrógeno según sus necesidades. Un vehículo podría volar meses enteros en las atmósferas de Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, reuniendo información detallada acerca de su composición, patrones climáticos y otras características. O podría volar a Europa, Plutón o Titán para recoger muestras de rocas y acumular hidrógeno, por electrólisis del agua de fusión del hielo, para el viaje de regreso a la Tierra.

Puesto que el reactor se pondría en marcha a mucha distancia de la Tierra, una astronave de propulsión nuclear podría construirse menos peligrosa que algunas de las sondas de espacio lejano de propulsores quími-

cos. En las regiones más externas del sistema solar, los rayos del Sol son demasiado débiles y la energía que ofrecen no basta para los instrumentos de a bordo. Estos suelen alimentarse con pilas de plutonio 238, intensamente radiactivas incluso en la fase de lanzamiento. En una sonda de propulsores nucleares, por su parte, los instrumentos serían alimentados por el mismo reactor que genera el empuje. Además, la cantidad de residuos radiactivos sería despreciable (un gramo de productos de fisión en una misión en el espacio lejano); en cualquier caso, el material nunca regresaría a la Tierra.

Los cohetes nucleares no son nuevos. Entre los proyectos del Departamento de Defensa de EE.UU. figuraba, a finales de los años ochenta, el programa de Propulsión Termonuclear Espacial. Se deseaba un motor nuclear, compacto y ligero, para poner en órbitas terrestres de gran altitud cargas útiles y para otros intereses de la defensa. El proyecto pivotaba en torno a un reactor de lecho de partículas (PBR), cuyo combustible consistía en partículas de carburo de uranio, cubiertas de carburo de zirconio, empaquetadas. Aunque los trabajos sobre el PBR acabaron antes de que se construyera un motor nuclear de tamaño normal, los ingenieros proyectaron reactores de baja potencia basados en ese concepto y demostraron que podían lograrse fuertes densidades de potencia.

Nuestro Mitee le debe mucho a la investigación sobre el PBR, en el que mis colegas y yo trabajamos durante casi diez años en el Laboratorio Nacional de Brookhaven. Además de la misma configuración anular básica de los elementos de combustible, el Mitee emplearía también como moderador hidruro de litio 7 estable. Pero la sección de combustible del Mitee la proyectamos para una densidad de potencia de 10 megawatts por litro, no para los 30 del PBR.

Es un hecho comprobado que sólo con cohetes químicos no podemos explorar bien los planetas exteriores y sus lunas. Dependemos de los cohetes nucleares para lograr la potencia, fiabilidad y flexibilidad que necesitaríamos para descifrar los mundos misteriosos que se esconden en los confines del sistema solar.

JAMES R. POWELL es presidente de Plus Ultra Technologies, de Shorehan (Nueva York), empresa que concibió y proyectó el reactor Mitee para propulsión espacial. *Desea agradecer a sus colaboradores George Maise y John Paniagua la ayuda en la preparación de este artículo.*

su diseño ha de estar integrado en el cuerpo de la nave para conseguir un empuje adecuado. La NASA concedió recientemente a la empresa Boeing un contrato a coste compartido incluido en su nuevo programa Future-X para desarrollar un Vehículo de Técnica Avanzada, en el que se probarán diversas técnicas de vuelo hipersónico. Payton afirma que “si las cosas van bien”, entre 2004 y 2006 podría haber vuelos de prueba de los motores cohete de ciclo combinado.

Más allá de la Tierra

En cuanto el vehículo sale de la atmósfera y alcanza la velocidad orbital, en torno a Mach 25, la ingeniería se encara con retos de nuevo cuño. Ya no se necesitan empujes fortísimos, pues la nave no tiene que vencer la gravedad terrestre ni la resistencia del aire. Se están explorando nuevos caminos; uno de ellos, el motor iónico de la sonda *Deep Space* 1. Los motores iónicos funcionan gracias a la aceleración de los átomos cargados (iones) de un agente propulsor producida por rejillas eléctricas cargadas en alta tensión. Al abandonar el motor, los iones producen un empuje. Como propulsor se recomienda actualmente el xenón.

El *Deep Space* 1 recibe energía de sus paneles solares. En teoría, podría utilizarse cualquier tipo de generador eléctrico para alimentar un motor iónico, que es capaz de producir casi 10 veces más empuje por kilogramo de combustible que los cohetes químicos. De ahí resulta que, aun cuando los motores iónicos generan sólo unos pocos gramos de fuerza, en principio pueden funcionar sin interrupción durante años, lo que permite que la nave espacial alcance velocidades celerísimas. Con motores iónicos podrían ser factibles las largas misiones de exploración de Urano y Neptuno, que traerían consigo al regresar muchos más datos que las simples pasadas del *Voyager* 2 en los años ochenta.

Los motores iónicos no son los únicos propulsores sujetos a examen para futuras exploraciones del sistema solar. Los impulsores de Hall también aceleran iones, aunque sin rejillas. Emplean campos magnéticos radiales, en parte, para dirigir los iones, y pueden suministrar empujes mayores; según la NASA, se ha probado una

Space Access	
	Año aproximado de lanzamiento: **2003**
	Coste aproximado: **de 600.000 a 900.000 mill. de pesetas**
	Fuente de energía: **Motores atmosféricos, cohetes**



4. AVION ESPACIAL PESADO que desarrolla Space Access. La nave empleará aerorreactores de eyección para acelerarse hasta Mach 6, tras lo cual pasará a utilizar los motores cohete. Las fases, separadas, regresarán a la pista de lanzamiento cada una por su lado.

versión de 50 kilowatts, y los modelos de laboratorio dan un rendimiento de combustible que no desmerece del de un motor iónico. Por ahora tales dispositivos tienen su principal atractivo en aplicaciones próximas a la Tierra, aunque esto podría cambiar si mejoran las prestaciones. El gobierno de EE.UU. ya ha utilizado una aplicación para una carga útil clasificada; la empresa Teledesic —que proyecta ofrecer un servicio mundial de telecomunicaciones en banda ancha— utilizará impulsores Hall en su flota de satélites.

Casi todos los satélites en órbitas cercanas a la Tierra recurren a las células fotovoltaicas, cuyo rendimiento

Alcanzar las estrellas

Stephanie D. Leifer

La idea de viajar a las estrellas aparece recurrente en incontables manifestaciones artístico-culturales, desde la poesía romana hasta la música popular del siglo XX. Cuando un novelista, un poeta o un letrista habla de alcanzar las estrellas, de inmediato lo asociamos a una lucha por lo inasible.

Aunque los viajes interestelares sigan siendo un sueño, ingenieros e investigadores ya está examinando ideas y realizando experimentos que pudieran desembocar en técnicas capaces de propulsar astronaves hasta velocidades que permitan traspasar los confines del sistema solar. Un mecanismo de propulsión basado en la fusión nuclear podría portar al hombre hasta planetas lejanos y dirigir una astronave robótica, adentrada en espacio interestelar, a lo largo de miles de unidades astronómicas (una unidad astronómica, 150 millones de kilómetros, es la distancia media de la Tierra al Sol). Un sistema de este tipo podría fabricarse en los próximos decenios. Con el tiempo, otros ingenios más potentes, impulsados por la aniquilación mutua de materia y antimateria, podría acercar una astronave hasta las estrellas vecinas, la más inmediata de las cuales, Proxima Centauri, se halla a 270.000 unidades astronómicas.



1. EN UN INGENIO INTERESTELAR de propulsión por antimateria habría cierta distancia entre la carga útil y la planta motriz. El anillo forma parte de la tobera magnética que encauzaría las partículas cargadas para generar empuje.

El atractivo de tan exóticos modos de propulsión reside en las fantásticas cantidades de energía que liberarían a partir de una masa de combustible dada. Un sistema de propulsión basado en la fusión produciría, en principio, 100 billones de joules por kilogramo de fuel, densidad de energía 10 millones de veces superior a la cifra correspondiente de los cohetes químicos que propulsan nuestras astronaves. Las reacciones materia-antimateria, aunque más difíciles de aprovechar, generarían 20.000 billones de joules mediante un solo kilogramo de combustible, suficientes para satisfacer las necesidad energéticas de nuestro mundo durante unos 26 minutos.

En la fusión nuclear, se provoca el encuentro entre átomos muy ligeros, bajo una temperatura y una presión lo bastante altas, y durante el tiempo suficiente, para que se combinen y creen átomos de masa mayor. La diferencia de masa entre reactivos y productos de la reacción corresponde a la cantidad de energía liberada, de acuerdo con la fórmula de Albert Einstein $E = mc^2$.

Los obstáculos que se interponen para aprovechar la fusión, y no digamos la antimateria, son imponentes. Cuanto se refiere a la fusión controlada, sea para propulsar cohetes o para generar energía en tierra, responde a la técnica empleada para confinar el plasma, que es doble. En la fusión por confinamiento magnético, el plasma —gas calentísimo y eléctricamente cargado— está contenido en campos magnéticos muy intensos. La fusión por confinamiento inercial descansa en haces de láser o de iones para calentar y comprimir una minúscula pastilla de combustible.

En noviembre de 1997 expertos en confinamiento magnético crearon una reacción de fusión que produjo el 65 por ciento de la energía invertida. Ocurrió en el Toro Conjunto Europeo, una instalación de tipo tokamak, en forma de rosquilla, donde el plasma se mantiene en confinamiento magnético. Para iniciar o sostener la reacción, un reactor de fusión comercial tendría que producir mucha más energía de la que consume.

Pero aunque en la Tierra se hiciera realidad la energía de fusión comercial, para desarrollar cohetes de fusión habría que resolver algunos problemas específicos. De entrada, el de encauzar las partículas energéticas y dotadas de carga para que generen un empuje eficaz. Otras dificultades tienen que ver con la adquisición y almacenamiento de la cantidad suficiente de combustible; también, con la maximización de la cantidad de potencia producida respecto a la masa de la nave.

Desde finales de los años cincuenta, se han avanzado docenas de ideas para cohetes de fusión nuclear. Aunque esta reacción produce cantidades ingentes de partículas energéticas, sólo acelerará la nave si se logra encauzar las partículas para forzar el empuje. En los sistemas de fusión basados en el confinamiento magnético, se trataría de cebar combustible para mantener la reacción, permitiendo el escape de algo de plasma para generar empuje. Puesto que el plasma destruiría cualquier vasija donde se hallara, para encauzar las partículas hacia el exterior del cohete se emplearían campos magnéticos muy intensos, producidos por una tobera magnética.

En un motor basado en el confinamiento inercial, haces de láser o de iones de gran potencia encenderían las pastillas de combustible a razón de unas 30 por segundo. Para crear empuje podría bastar una tobera magnética que encaminara las partículas hacia el exterior del motor.

Las partículas creadas en una reacción de fusión nuclear dependen del combustible. La reacción de iniciación más fácil se da entre el deuterio y el tritio, dos isótopos pesados del hidrógeno cuyos núcleos atómicos incluyen, respectivamente, uno y dos neutrones, además de un protón. La reacción produce neutrones y núcleos de helio (partículas alfa). Para el empuje convienen partículas alfa, con sus cargas positivas; no así neutrones, a los que resulta imposible conferirles un rumbo, pues no portan carga. Sí cabe aprovechar para la propulsión la energía cinética de los neutrones; con ese fin, habría que retenerlos en el

mejorará. En sus diseños avanzados la NASA incorpora infinidad de diminutas lentes que concentran la luz solar en el material fotovoltaico. En la sonda *Deep Space* 1 se está comprobando la eficacia real de este dispositivo.

Pero la energía solar puede proporcionar fuerza impulsora de modo más directo. La Fuerza Aérea estadounidense ha comprometido 7200 millones de pesetas en un programa de cuatro años para el desarrollo de una fase final de cohete con propulsión solar que llevaría una nave desde la órbita terrestre baja hasta la órbita geoestacionaria por sólo una fracción del coste de los cohetes químicos. El llamado Vehículo Solar de Transferencia

seno de algún material y hacer uso del calor generado en la captura. Además, la radiación de neutrones supone un peligro para una tripulación humana y precisaría un apantallamiento extraordinario en la misiones tripuladas.

He ahí, pues, los problemas que comporta la elección del combustible. Aunque iniciar la fusión sea fácil con deuterio y tritio, hay razones sobradas para inclinarse por el deuterio y el isótopo helio 3 (dos protones, un neutrón). La fusión de esos núcleos produce una partícula alfa y un protón, ambos manipulables mediante campos magnéticos.

Sin embargo, el helio 3 es sumamente raro en nuestro planeta. Además, cuesta bastante más iniciar la reacción deuterio-helio 3 que la deuterio-tritio. Mas, cualquiera que sea el combustible elegido, se trate de transportar viajeros hasta los confines últimos del sistema solar o pasearlos por el espacio interestelar, se requeriría una astronave de miles de toneladas, en su mayor parte de combustible (a modo de referencia, la Estación Espacial Internacional tendrá una masa de unas 500 toneladas).

Una por una, las dificultades de la propulsión por fusión nuclear parecen disuasorias. Recordemos: conseguir más potencia de una reacción controlada, construir unos dispositivos de confinamiento y unas toberas magnéticas eficaces y hacerse con combustible suficiente. Una por una, también, tienen solución en el horizonte.

En primer lugar, cabe confiar en que los reactores de fusión superen el umbral de rentabilidad, punto en el cual el reactor produce la misma cantidad de energía que consume. En EE.UU., la investigación en confinamiento inercial recibe cuantiosa subvención, en el marco de un programa sobre procedimientos para certificar la seguridad y la fiabilidad de las armas termonucleares sin disparo de prueba. La investigación tiene su centro en la Estación de Ignición Nacional, en fase de construcción y adscrita al Laboratorio Lawrence en Livermore. Se espera que la instalación opere en el año 2001, con una energía de láser total de 1,8 millones de joules (durante cuatro mil millonésimas de segundo) disponible en 2003. Mediante esa potencia se prevé liberar diez veces la energía requerida para iniciar la reacción.

El tokamak, predominante en el estudio sobre confinamiento magnético, podría reemplazarse por técnicas más compactas y afines a la propulsión cohete. En 1996, el Departamento de Energía de EE.UU. respaldó la investigación en retracción de campo inverso, configuración de campo invertido y tokamak esférico, aspectos prometedores del confinamiento magnético.

A la par, se han iniciado los trabajos sobre las toberas magnéticas. En un empeño conjunto se han embarcado la NASA, la Universidad estatal de Ohio y el Laboratorio Nacional de Los Alamos. Se emplean, en los ensayos, intensísimas corrientes eléctricas para crear un plasma y estudiar sus interacciones con un campo magnético.

Hasta el problema del combustible podría encontrar parcial solución. Pese a la escasez de helio 3 en nuestro planeta, algo más hay en suelo lunar, así como en la atmósfera de Júpiter. Además, otros elementos que se encuentran en la Tierra, pensemos en el boro, podrían participar en otras reacciones de fusión, de ignición difícil aunque generadoras de partículas alfa.

Pero en lo que concierne a la propulsión por fusión la esperanza blanca es un fenómeno físico conocido, la aniquilación materia-antimateria, que libera mucha más energía para la misma masa de los reactivos. Un sistema de propulsión espacial basado en este principio aprovecharía la aniquilación mutua entre protones y antiprotones.

Dicha aniquilación da por resultado una serie de reacciones. En la primera se producen piones, partículas de vida corta sobre algunas de las cuales pueden actuar los campos magnéticos y generar empuje. Los piones resultantes de la aniquilación materia-antimateria se mueven a velocidades próximas a la de la luz.

Pero vuelve a surgir el problema de la carencia: el número de antiprotones producidos en todos los aceleradores juntos de partículas de alta energía se reduce a unas pocas decenas de nanogramos al año. Para acercar el hombre hasta la estrella más inmediata, Proxima Centauri, un sistema impulsor por materia-antimateria necesitaría toneladas de antiprotones. La captura, el almacenamiento y la manipulación de antiprotones presentan otras dificultades notables, pues esas partículas se aniquilan al contacto con los protones ordinarios.

Sin embargo, podría tal vez aprovecharse el contenido energético de la antimateria si la necesidad de antiprotones fuera menor, en cuantía verosímilmente alcanzable de aquí a unos años. En este sistema se emplearían los antiprotones para activar la fusión por confinamiento inercial. Con ese fin, los antiprotones penetrarían en los núcleos de átomos pesados, aniquilándose con los protones y causando la fisión de cada núcleo pesado. La energía de los fragmentos de la fisión calentaría el combustible de fusión, iniciando así la reacción de fusión. Se están dando los primeros pasos para determinar la viabilidad de un sistema de propulsión de este tipo. Bajo el patrocinio de la NASA, se trabaja en un proyecto y construcción, en la Universidad estatal de Pennsylvania, de un dispositivo que permita capturar y transportar antiprotones.



2. UNA NAVE ESPACIAL interestelar tripulada estaría dotada de una estructura delantera rotatoria, para simular la gravedad en cuatro compartimentos.

Las dificultades que hoy hallamos para construir sistemas de propulsión por fusión, y no digamos por antimateria, pueden parecer insuperables. Pero la humanidad logró en el pasado cosas imposibles. El programa Apolo y el Proyecto Manhattan demostraron hasta dónde se llega si se ponen en juego unos esfuerzos conjuntados. Con la propulsión por fusión o por antimateria, las apuestas no podrían ser más altas, pues se trata de las técnicas mediante las cuales la humanidad acabará realmente alcanzando las estrellas.

STEPHANIE D. LEIFER pertenece al Grupo de Técnica de Propulsión Avanzada del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena (California).

de Orbita se vale de un ligero espejo para dirigir la luz solar hacia un bloque de grafito, que se calienta hasta 2100 grados y vaporiza el hidrógeno líquido almacenado. Al expansionarse, el gas proporciona el empuje.

Una versión operativa tardaría de tres a ocho semanas en transportar una carga útil hasta la órbita geoestacionaria; mas, gracias a su ligereza de peso el satélite podría ir en un cohete menor que en el resto de los casos. En cada lanzamiento, los ahorros suponen miles de millones de pesetas.

El Sol, sin embargo, no puede hacer más de lo que hace, y es difícil aprovecharse de la energía solar en viajes a planetas allende Júpiter. La misión *Galileo* a Júpiter y la *Cassini* a Saturno empleaban, ambas, generadores térmicos de radiosótopos, que utilizan el calor generado por la desintegración radiactiva del plutonio 238 para generar electricidad en proporciones modestas. Pero en esta técnica no es fácil aumentar la escala para suministrar cantidades mayores.

Muchos entusiastas opinan que la respuesta podría hallarse en reactores nucleares proyectados para el espacio. Dado que el reactor, al operar, produce residuos radiactivos, los que defienden la energía nuclear espacial piensan en modelos que se lanzarían inactivos y encerrados en cohetes químicos, para activarse en cuanto penetraran en una zona de seguridad para la Tierra. Ello eliminaría la amenaza de un accidente en el lanzamiento. Ciertas estimaciones indican que un viaje a Marte propulsado por energía nuclear duraría 100 días, la mitad de lo que tardaría un cohete químico. También podría valer el reactor nuclear para suministrar energía a una base en Marte, señala Samuel L. Venneri.

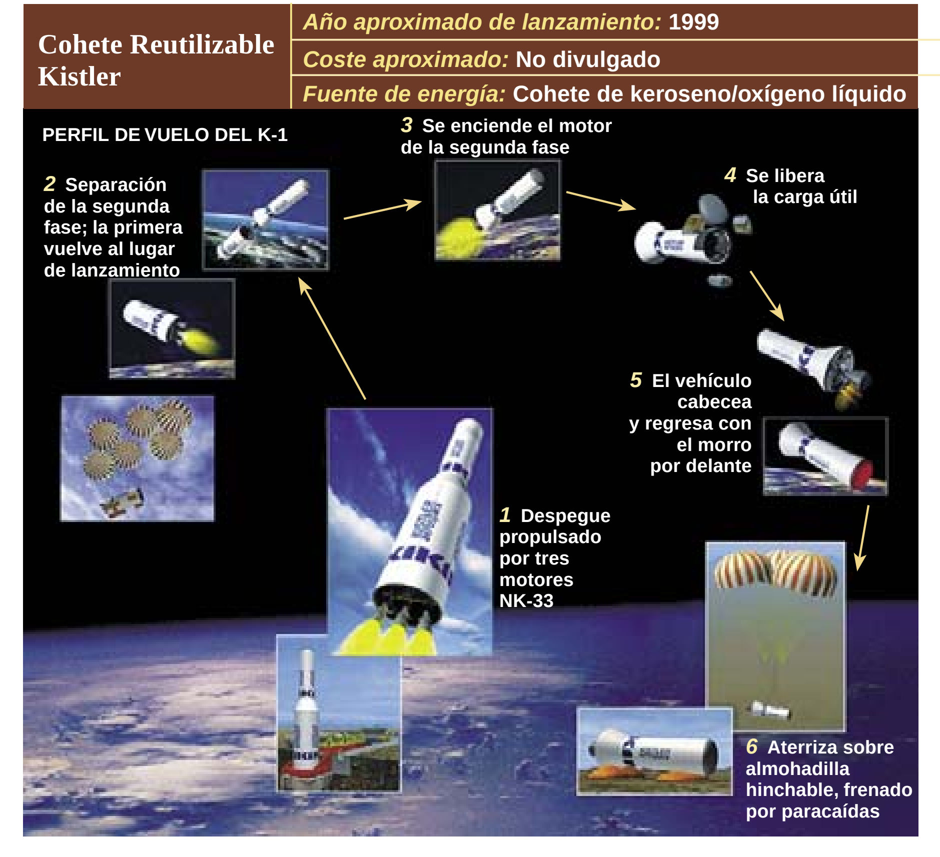
Para la propulsión podrían emplearse de formas múltiples los reactores. Por ejemplo: generar directamente la fuerza impulsora, operando en una breve e intensa ráfaga. James R. Powell sostiene que con este diseño se traerían a la Tierra muestras de roca desde Plutón. Hay otras alternativas; así, proyectar un reactor que generase calor durante largos períodos. Se dispondría, pues, de varios mecanismos para convertir calor en electricidad y excitar motores iónicos, impulsores de Hall o un nuevo tipo de propulsión eléctrica (impulsor magnetoplasmodinámico). “Es posible combinar y armonizar diferentes conceptos de reactor y de impulsor”, observa Gary L. Bennett. Sin embargo, el fuerte rechazo público a todo lo nuclear indica que los reactores espaciales tropezarían con enormes obstáculos en el terreno político; la NASA ha optado por guardar en el cajón sus planes en esta materia.

Cada vez más arriba

Haya llegado o no a su desarrollo final la energía nuclear en el espacio, los ingenieros miran con optimismo las perspectivas de nuevas exploraciones del sistema solar. Mediante un esfuerzo sostenido en los próximos 40 años podrían reducirse los costes de lanzamiento desde 3.000.000 de pesetas por kilogramo hasta unas humildes 300 pesetas. Quienes así opinan barruntan que el empleo de lanzadores reutilizables que alcanzan la órbita con una sola fase (orbitadores monofase) lograría la primera reducción a la décima parte de aquí a diez años.

Otra fuente de ahorro vendría del uso de motores que combinen técnicas hipersónicas con la propulsión por cohetes, unidos a nuevos agentes propulsores de alta energía. (Los vehículos orbitadores monofase reutilizables, capaces de 1000 vuelos anuales cada uno, podrían aportar otra solución para reducir los costes de lanzamiento a 30.000 pesetas/kilogramo.) Sin olvidar las catapultas de levitación magnética, dispositivos que mantendrían suspendido un vehículo movido por cohete sobre una pista, a semejanza del tren de levitación magnética. La pista se inclinaría hacia arriba por un extremo, tal vez construida sobre la ladera de una montaña. El vehículo, acelerado por el cohete a lo largo de la pista, saldría disparado a los cielos con un ángulo de inclinación de 30 a 40 grados, con una velocidad próxima a la del sonido.

De aquí a veinte años podría haber vehículos movidos por microondas, como los diseños descritos por Leik N. Myrabo. Estos vehículos crearían el empuje por medio de fuerzas magnetohidrodinámicas, engendradas cuando un fluido o gas conductor atraviesa campos eléctricos y magnéticos cruzados. Aunque la ingeniería tropieza con notables obstáculos, muchos de los que han examinado el principio confían en su operatividad. Como la transmisión por haz de la energía



5. “EL PRIMER LANZADOR REUTILIZABLE DEL MUNDO”, así describe Kistler Aerospace su cohete K-1. Se espera que vuele a finales de este año. Consta de dos fases que utiliza motores de fabricación rusa, con keroseno y oxígeno líquido. Las fases separadas regresan a la Tierra en paracaídas.

Sistema de Propulsión Iónica	
	Año de lanzamiento: 1998
	Coste: 22.500 millones de pesetas
	Fuente de energía: Fotovoltaica



6. EL MOTOR IONICO opera ya en la sonda *Deep Space* 1, dispuesta a visitar un cometa. El sistema utiliza paneles solares para generar campos eléctricos que aceleran átomos cargados de xenón. El motor puede funcionar durante semanas seguidas y alcanzar así altas velocidades.

orilla la exigencia de sacar oxidante o combustible fuera del campo gravitatorio terrestre, la propulsión de un vehículo por láser o microondas debería reducir los costes de lanzamiento a 3000 pesetas por kilogramo.

Myrabo comparte el criterio de quienes piensan que la propulsión por energía transmitida en haz podría apoyarse en una red de estaciones orbitales de energía solar. En principio, las estaciones espaciales ofrecen muchas ventajas; tienen la garantía de recibir gran número de fotones en la parte de su órbita iluminada por el Sol. La NASA estudia la posibilidad de suministrar energía a usuarios terrestres, aunque quizá deban considerarse mejor los factores económicos en esta aplicación; podrían recortarse gastos con estructuras hinchables en la órbita terrestre baja.

Las estaciones orbitales de energía solar tendrían más sentido económico si pudieran abastecer a las naves en vuelo.

Los apasionados del espacio también cantan las excelencias de los cables, unos largos amarres de unión que en órbita adquieren propiedades asombrosas, casi las de un medio de propulsión. Su original comportamiento se debe a que, para mantenerse en órbita, la velocidad horizontal de un objeto es ligeramente inferior a la de otro algo más cercano al centro de la Tierra. De ahí que, cuando se unen objetos de diferente altitud por una cable de longitud mayor de varios cientos de metros, se crean potentes fuerzas que mantienen tenso el amarre.

Pueden entonces intervenir sobre los cuerpos cableados otros principios físicos, en particular la conservación del momento angular. La conclusión, por vías de mecánica intuitiva, es que el cable puede actuar como una honda gigante para transferir de modo eficaz el momento angular entre las cargas útiles, y de este modo lanzar los satélites de una órbita a otra. Las versiones provistas de conducción eléctrica pueden servir incluso para generar electricidad o contribuir a la fuerza ascensional. No obstante, sigue siendo muy difícil la predicción y el control de la dinámica en órbita de los grandes sistemas de muchos cuerpos.

Los cables abren también la fascinante posibilidad de conectar la Tierra entera a un satélite de la órbita geoestacionaria por medio de una línea de amarre fija y sujeta a un punto del ecuador. Podrían luego ascender por este cable dispositivos transportadores hasta cualquier altitud que se desee, inferior a 36.000 kilómetros, con muy poco consumo de energía.

No podemos pensar, hoy por hoy, en construir ahora un cable de este tipo. Se hallaría sometido a fuerzas que exigirían un material mucho más resistente en relación con su peso que el Kevlar, polímero utilizado para cables de pequeña longitud. Pero los tubos de algunos nanómetros de diámetro formados por fibras microscópicas de átomos de carbono ("buckytubos") podrían esconder la solución. En un sistema de cable geoestacionario podría reducirse a 300 pesetas/kilogramo el coste del lanzamiento.

Por si estos sistemas no fueran lo bastante ambiciosos, hay quien da vueltas a las posibilidades de que una nave espacial arribe a otra estrella. El enfoque que hoy parece más prometedor es el de las velas ligeras, ingenios que servirían, además, para transportar cargas por el sistema solar.

Explotar la enorme potencia teórica de la fusión nuclear para la propulsión de naves espaciales tiene también sus partidarios. Aunque la producción controlada de energía útil a partir de la fusión todavía no se ha logrado en la Tierra, la esperanza nunca se agota: un reactor de fusión en el espacio engendraría energía suficiente para alcanzar cómodamente cualquier destino del sistema solar.

Se han barajado ideas todavía más avanzadas sobre técnicas de propulsión capaces de hacer realidad los viajes interestelares: el teletransporte cuántico, los agujeros de gusano ("wormholes") en el espacio y la eliminación de la cantidad de movimiento. Estas "descabelladas" ideas parecen exigir una nueva comprensión de la física para su puesta en práctica; hoy ni siquiera podemos enumerar las etapas necesarias para hacerlas viables. Aun así, algunos buscan el modo de plasmar en realidades estos conceptos. Si lo logran, cambiarán radicalmente nuestras ideas acerca del universo. Y nadie está autorizado para asegurar que cualquiera de esas ideas sea rechazable de plano.

Shawn Carlson

Acoso al punto triple

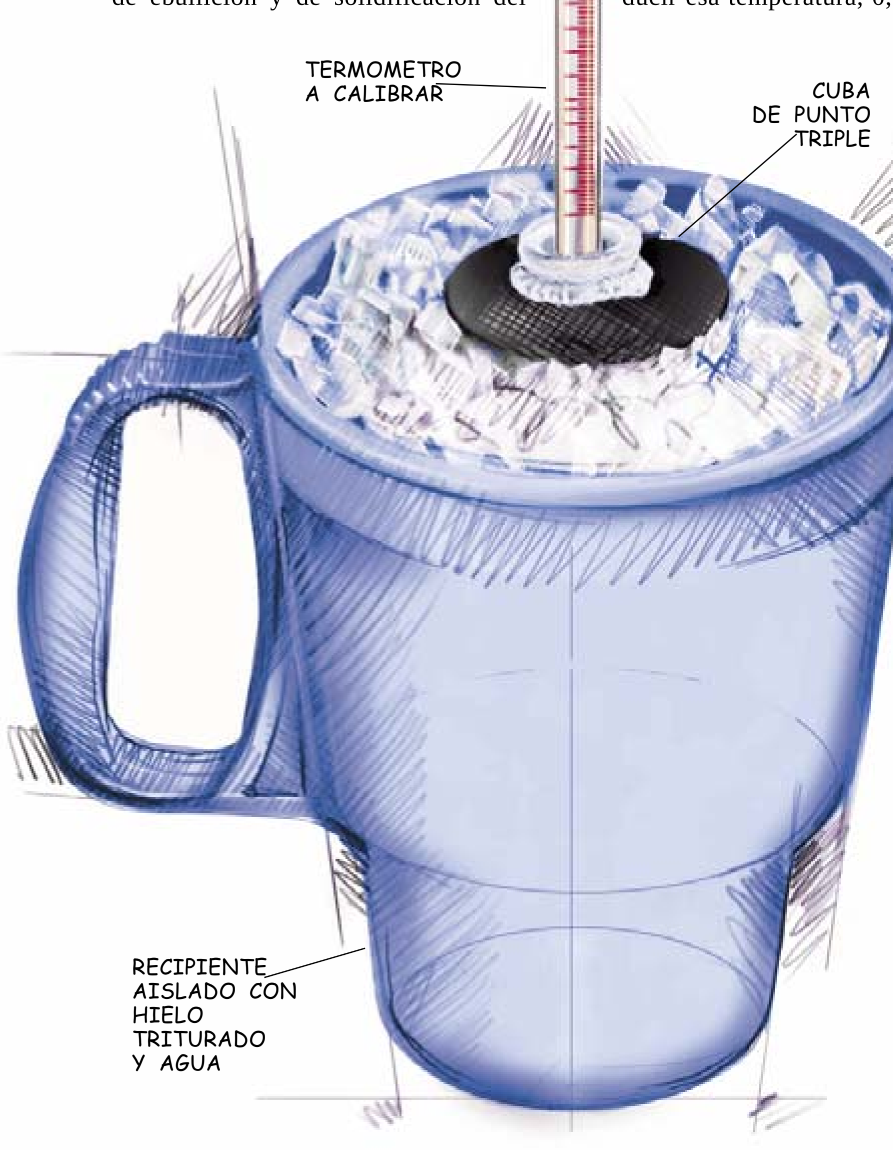
Una de las limitaciones de la investigación estriba en la escasez de medios que no nos permite llegar más lejos. A partir de cierto punto, una mayor precisión requiere desembolso, dedicación y frustraciones. Tiene la culpa en parte la necesidad de operar con un instrumento bien calibrado; conseguir un instrumento bien calibrado puede convertirse en un reto muy duro.

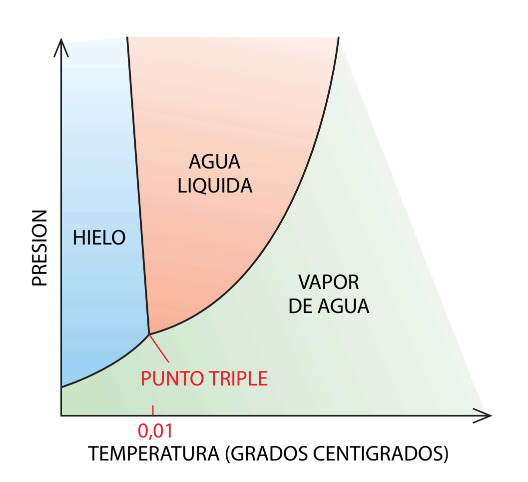
Consideremos los termómetros. Parecen fáciles de calibrar; basta determinar su lectura a dos temperaturas conocidas, tales como los puntos de ebullición y de solidificación del agua. La cosa no es tan simple. Esas temperaturas no pueden reproducirse exactamente, pues dependen de factores harto difíciles de controlar; por ejemplo, la presión atmosférica. Para trabajar con la precisión debida, hay que recurrir a técnicas más refinadas.

Contamos con un método basado en una propiedad del agua providencialmente reproducible: el punto triple, temperatura a la que el agua se da en sus tres fases, sólida, líquida y gaseosa, las tres en equilibrio. Para reproducir esa temperatura, 0,01 grados centígrados, se emplea un frasco de vidrio pyrex especial lleno de agua ultrapura, evacuado con una bomba de vacío y luego sellado herméticamente con un soplete. A mil dólares la pieza. Pero con menos de 50 vamos a conseguirlo siguiendo a George Schmermund, cuyo instrumento se mantiene, durante días, dentro de 0,0001ºC del punto triple.

Su construcción es fácil. Partimos de un frasco pyrex recto de unos cinco cm de diámetro y una altura de al menos 17 cm. Schmermund recurre a un soplador de vidrios para que le engruese y abocine un poco la boca, de modo que entre el frasco y un gran tapón de caucho el ajuste sea forzado. Sin ello, el borde podría estallar. Por precaución se recomienda envolver con cinta aislante los dos centímetros superiores del frasco.

En el tapón se abre un orificio y en éste se inserta un tubo de ensayo de vidrio pyrex, que llegue a unos dos centímetros del fondo del frasco. Para asegurar un ajuste hermético entre el tapón y el frasco, extiéndase una





1. La calibración del termómetro puede hacerse en un frasco o "cuba de punto triple" que se estabiliza a 0,01 grados centígrados, temperatura singular en que el agua se presenta en sus tres fases, sólida, líquida y gaseosa (abajo). *Parte del hielo triturado, que debería cubrir la cuba, se ha retirado para ofrecer una mejor visión del aparato*

película fina de grasa de silicona para vacío sobre los dos tercios inferiores del tapón.

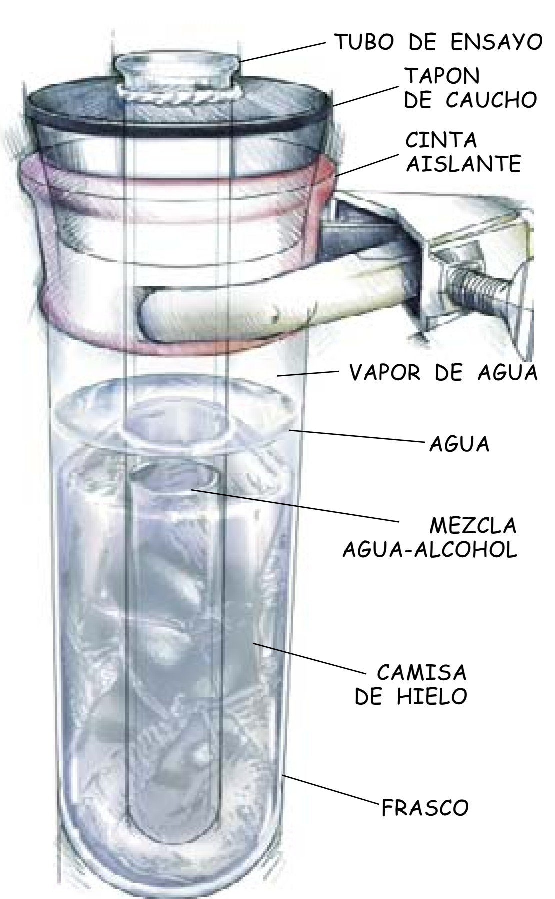
Aunque los instrumentos profesionales contienen agua ultrapura de triple destilación, nos sirve el agua destilada ordinaria. Llénese el frasco de modo que el agua suba hasta unos cinco centímetros por debajo del tapón, una vez colocado.

A continuación, debe extraerse el aire de la atmósfera de la cámara, así como los gases disueltos en el agua. Schmermund obvia la bomba de vacío hirviendo el agua; el vapor, al expandirse, expulsa al exterior las moléculas de aire. Pero antes, para prevenir una ebullición violenta del agua, haremos añicos un tubo de ensayo envuelto en una toalla e introduciremos algunos trocitos dentro del frasco para que actúen como focos de nucleación de burbujas. Seguidamente, afianzaremos la cuba en un soporte anular y poco a poco introduciremos el tapón en la boca del frasco para que el vapor pueda escapar.

El fondo del frasco se calienta con un mechero de propano hasta que el agua hierva de un modo suave. Los gases disueltos en el frasco formarán burbujas visibles sobre el tubo de ensayo interno. Se mantendrá el agua en ebullición hasta que las corrientes convectivas las hayan arrastrado y hasta que ya no se vean condensaciones en la cara interna del tapón. Las condensaciones habrán desaparecido cuando toda la atmósfera interna se haya sustituido por vapor.

Se retira entonces la llama y al instante se oprime el tapón hasta que forme un cierre estanco al vacío. No olvidemos proteger manos y brazos con manguitos y guantes. Téngase, además, una toalla sobre el frasco.

Si ahora sumergimos el frasco, caliente y estanco, en un baño frío el agua contenida en el vaso volverá a hervir. Tan delicioso efecto se debe a que el vapor encerrado en el frasco se condensa, rebajando la presión interna, lo que a su vez disminuye la temperatura de ebullición. Enfriado el frasco comprobaremos la calidad del vacío dándole una sacudida vertical *suave*. (Ojo, una sacudida violenta podría hacer añicos el vidrio.) Debe oírse entonces un "crujido" agudo provocado por el efecto golpe de ariete: el agua, sin la amortiguación del aire, golpeará con fuerza contra el vidrio. Si no se oyera ese sonido, regenérese el vacío.



2. Una "cuba de punto triple" es un frasco hermético que encierra vapor de agua, agua líquida y una camisa de hielo formado alrededor de un tubo de ensayo interno

Para conseguir el punto triple, primero hay que enfriar la cuba durante la noche en un frigorífico. A continuación se forma una camisa de hielo espesa alrededor del tubo de ensayo interno. Los profesionales acostumbran verter una mezcla frígida de hielo seco y alcohol por el caño interno, pero Schmermund logra unos resultados fantásticos con nitrógeno líquido, que está mucho más frío. Antes de introducir el líquido enfriador, séquese bien la cara interna del tubo de ensayo, pues el vidrio podría agrietarse si se forma hielo en el caño. Téngase presente que la refracción hará que parezca que la camisa de hielo crece más deprisa de lo que lo hace en realidad. Cuando la camisa parezca que casi toca al frasco, tírese el refrigerante restante.

El uso de nitrógeno líquido entraña una complicación. En este caso, la camisa de hielo se forma más rápido en el fondo al estar en contacto más tiempo con el nitrógeno. Para lograr una camisa uniforme, Schmermund deja periódicamente que todo el nitrógeno se evapore y luego introduce espigas de madera de tamaño creciente. Así, el nitrógeno en exceso hierve con fuerza en torno a la espiga y los gases en expansión tienden a mantener el líquido enfriador por encima del extremo superior de la espiga.

Sepárese la camisa del tubo de ensayo llenando el caño con agua destilada y alcohol isopropílico al 10 por ciento para fundir la superficie interna de la camisa. No se alarme, empero, cuando el hielo se agriete con violencia. Si, al rotar el frasco, la camisa no se mueve, es que el hielo ya no está adherido al vidrio. Cuando ello ocurra extraiga suficiente cantidad de la mezcla agua-alcohol para que su nivel quede a dos centímetros por debajo del borde superior del hielo.

Por último, se introduce la cuba dentro de una jarra llena de hielo triturado y agua. Como la camisa de hielo flota, presionará hacia arriba sobre el fondo del tubo de ensayo, haciendo que allí la temperatura sea levemente más fría que la del punto triple. Como separador resulta ideal un trozo de goma de borrar. Apóyese el termómetro sobre la parte superior del trozo de goma de borrar introducida en el caño. Al cabo de una hora, más o menos, el termómetro se habrá estabilizado en el punto triple.

Para determinar la temperatura, los termómetros de mayor calidad trabajan midiendo la resistencia de un hilo fino de platino. Puesto que se conoce la variación de resistencia del platino causada por una diferencia de temperatura dada, para calibrar el instrumento sólo necesitamos el punto triple. Pero esos termómetros tienen un precio prohibitivo. No para Schmermund; lo veremos en un próximo artículo.

Para más información acerca de este y otros proyectos visite el foro de debate "The Amateur Scientist" en web2.thesphere.com/SAS/WebX.cgi en la World Wide Web. Como servicio a la comunidad de aficionados, la Society for Amateur Scientits ofrece la cuba de punto triple de Schmermund por 75 dólares. Remita un cheque a la sociedad a 4735, Clairemont Square, Suite 179, San Diego, CA 92117, o llame al teléfono de la sociedad 1-619-239.88.07.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Ian Stewart

Teselaciones en papiroflexia

Muchos son los aspectos matemáticos del origami, el arte de la papiroflexia. Me propongo este mes centrarme en un curioso círculo de ideas, que concatenan el plegado de papel, los motivos de embaldosados y problemas de ingeniería.

Mi interés lo ha suscitado un artículo de Tibor Tarnic, "Folding of Uniform Plane Tessellations" (Plegado de teselaciones uniformes planas) publicado en 1994.

Toda estructura sometida a fuerzas excesivas se romperá o se pandeará. Las configuraciones de pandeo revisten especial interés en el caso de objetos metálicos cilíndricos de paredes finas. Mediante estructuras huecas se consigue bastante rigidez usando mucho menos material que con las macizas. Es posible que la más conocida sea la lata de aluminio de los refrescos.

Comprimido en sentido longitudinal, un cilindro metálico conserva su forma hasta que la fuerza alcanza un valor crítico, la carga de pandeo. Rebasada ésta, el cilindro se deforma y sufre un aplastamiento irregular. Pero en experimentos de laboratorio cabe limitar el grado de movimiento: por ejemplo, insertando en él otro cilindro macizo un poco menor o circundándolo con un fuerte tubo de vidrio, para observar la instauración de las configuraciones de pandeo en sus comienzos.

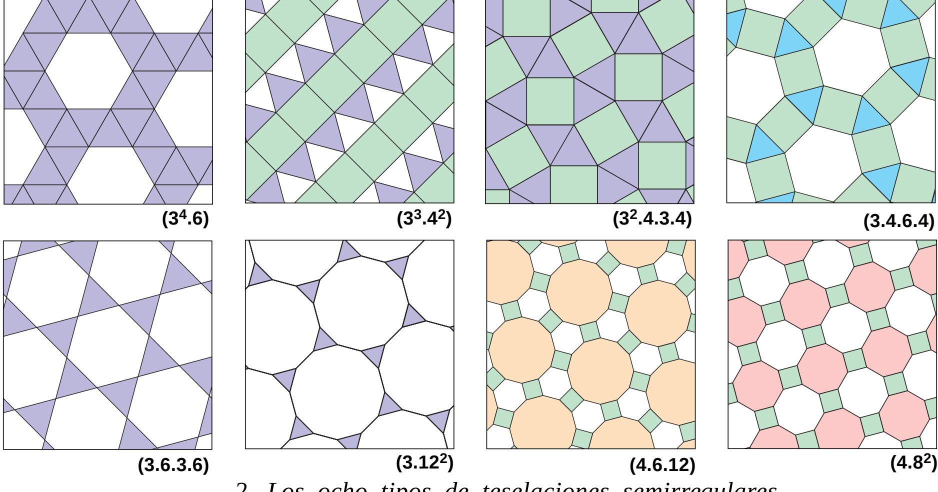
En el caso de un recipiente cilíndrico de fina chapa metálica, este modo primario de pandeo consiste en un hermoso motivo simétrico, compuesto por hundimientos de forma más o menos rómbica. La figura resultante se asemeja a la obtenida al plegar en triángulos una hoja de papel y arrollar después la hoja extendida alrededor de un cilindro. Observemos que el papel se pandea y arruga de forma muy similar a la de una fina lámina metálica.

El modo de pandeo primario es conocida por "configuración de Yoshimura". Cabe curvar regiones pequeñas de esta configuración hasta envolver un cilindro, lo que proporciona una excelente aproximación del pandeo "local" en los lugares por donde el cilindro, por ser más débil, empieza a ceder. La configuración de Yoshimura se logra a partir de un embaldosado del plano —una teselación— formado por triángulos isósceles.

Tarnai se preguntó si resultaría posible plegar de forma similar otras teselaciones planares. Se sabe desde la antigüedad que existen exactamente tres teselaciones uniformes regulares. "Regular" denota que todas las baldosas son polígonos regulares idénticos; "uniforme" expresa que la disposición de las teselas es la misma en cada vértice. Dichas teselaciones son las constituidas por triángulos equiláteros, por cuadrados y por la disposición de hexágonos en panal. Ludwig Schläfli demostró que existen ocho teselaciones "semirregulares" más, esto es, teselaciones en las que todas los losetas son polígonos regulares, aunque no necesariamente idénticos. Resulta conveniente representar tales teselaciones por su símbolo de Schläfli, que enumera el número de lados de las losetas, dadas en orden en torno al vértice.



1. Configuración de Yoshimura



2. Los ocho tipos de teselaciones semirregulares

Por ejemplo, la estructura en panal tiene el símbolo de Schläfli (6^3), lo que denota que hay tres hexágonos en cada vértice. Las otras dos teselaciones regulares tienen símbolos de Schläfli (3^6) y (4^4). Las teselaciones uniformes semirregulares presentan símbolos de Schläfli ($3^4.6$), ($3^3.4^2$), ($3^2.4.3.4$), (3.4.6.4), (3.6.3.6), (3.12^2), (4.6.12) y (4.8^2). Por ejemplo, la teselación (3.4.6.4) consta, en cada uno de sus vértices, de un triángulo equilátero (3), seguida de un cuadrado (4), después, de un hexágono (6) y, luego, de un segundo cuadrado (4). La teselación correspondiente a la configuración de Yoshimura se vale de una tesela que no es polígono regular, por lo que no figura en la lista anterior, aunque se parece a (3^6).

¿Cuáles, si alguna, de las configuraciones anteriores admiten ser plegadas a lo largo de los lados de

los polígonos, manteniendo planas las caras poligonales? Es obvio que la configuración (4^4), el embaldosado de cuarto de baño, puede ser plegada si doblamos el papel sólo a lo largo de las líneas horizontales o sólo según las verticales. Pero no es posible plegarla según una línea horizontal y una vertical, porque en las concurrencias de las crestas las losetas se verían forzadas a plegarse fuera de su plano.

En 1989, Koryo Miura demostró que no es posible plegar ninguna teselación en la que concurran tres lados en un vértice, lo que descarta las (6^3), (3.12^2), (4.6.12) y (4.8^2). Tampoco es difícil ver que las teselaciones ($3^4.6$) y (3.4.6.4) no son susceptibles de plegado.

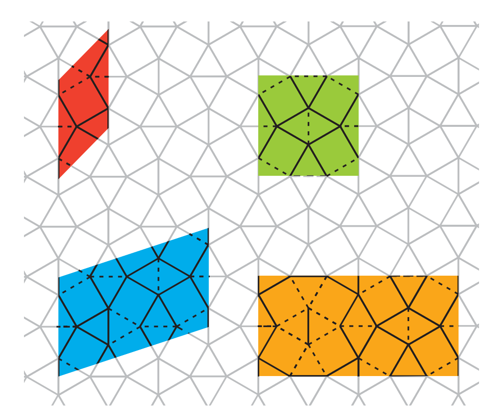
A lo largo de la teselación (3.6.3.6) corren líneas rectas, lo mismo que para la (4^4), lo que permite plegarla a lo largo de tales rectas, pero los resultados no son interesantes. Nos quedan las (3^6), ($3^3.4^2$) y ($3^2.4.3.4$); éstas, además de plegadas, pueden ser arrolladas en torno a un cilindro, como la configuración de Yoshimura.

En realidad, estas tres teselaciones pueden ser plegadas de muchas formas. En la figura 3 podemos observar cuatro formas de plegar la ($3^2.4.3.4$); las líneas continuas indican las "crestas" de los dobleces, y las de trazos, los "valles". Es decir, observadas desde un costado del papel, estas dos clases de dobleces se efectúan en direcciones contrarias. En la figura 4 tenemos tres de los cilindros deformados resultantes.

En cada caso, la configuración de las líneas de doblez se repite por todo el plano como si fuera un retículo. Los paralelogramos sombreados de la figura 3 indican una célula unitaria, que de repetirse por el plano indicaría todas las direcciones de plegamiento. La célula unitaria mínima (*rojo*) contiene dos teselas cuadradas y cuatro triangulares. Uno de estos cuadrados está descompuesto en dos piezas que, unidas, formarían un cuadrado si los lados opuestos de la célula unitaria se arrollaran hasta hacerlos adyacentes. Tarnai conjetura que ésta es la única posible pauta de plegado en la que la célula unitaria contiene dos cuadrados.

La segunda célula unitaria (*verde*) aloja cuatro cuadrados; se conjetura que es el único plegamiento con esa propiedad. La tercera célula unitaria (*azul*) contiene seis cuadrados; se sabe de cierto que los plegamientos que poseen esta propiedad no son únicos; tal vez desee el lector hallar algún otro. La última célula unitaria (*naranja*) contiene ocho cuadrados; tampoco estos plegamientos son únicos.

Como en la configuración de Yoshimura, algunos de estos plegamientos guardan semejanzas con las deformaciones y pandeos observados en cilindros reales.



3. Diagramas de plegado de la teselación ($3^2.4.3.4$), cuyas células unidad contienen dos cuadrados (rojo), *cuatro* (verde), *seis* (azul) *u ocho* (naranja)





4. Cilindros deformados correspondientes a los plegados rojo, verde y naranja de la figura 3

Acuse de recibo

Michele A. Vaccaro ha planteado una cuestión importante al respecto de la conjetura del fuelle (septiembre de 1998). En el artículo se afirmaba la existencia de una fórmula algebraica que relaciona el volumen de un poliedro con las longitudes de sus aristas, lo que a su vez implica que el volumen no puede variar cuando el poliedro experimenta una deformación continua, razón por la que no existen fuelles poliédricos de caras perfectamente rígidas. Sin embargo, al construir en cartulina el poliedro flexible de Klaus Steffen, Vaccaro desplazó algunos de los pliegues en valle y en cresta, y obtuvo otro poliedro.

Dado que está formado a partir de exactamente las mismas caras que el poliedro de Steffen, las longitudes de sus aristas son las mismas. Vaccaro, empero, se percató de que su volumen era mayor. La fórmula del volumen, sin embargo, no es errónea. Imaginemos un cubo sobre una de cuyas caras se ha construido una pirámide somera. La pirámide puede sobresalir hacia el exterior, como un tejado, o hundirse, como un hoyuelo. Estos dos sólidos tienen distinto volumen.

Dadas las longitudes de los lados, la fórmula del volumen proporciona una ecuación polinómica para determinarlo. Las ecuaciones polinómicas tienen, en general, varias soluciones distintas, de las cuales sólo una proporciona el volumen correcto para un poliedro dado. Otro poliedro podría tener aristas de las mismas longitudes pero diferente volumen.

Lo anterior en nada afecta a la inexistencia de fuelles matemáticos, porque una modificación continua del poliedro no puede hacer saltar bruscamente su volumen desde una raíz de la ecuación a otra solución diferente. El número de soluciones es finito, por lo que entre dos cualesquiera de ellas se encuentran números que no son soluciones. Por tanto, el volumen puede saltar, pero no puede variar gradualmente.

—I.S.



James Burke

Un número pequeño y ligero

El otro día me estaba sirviendo un vaso de delicioso burdeos antes de disponerme a contemplar uno de los espectáculos más formidables que se pueden ver hoy por televisión. Mientras degustaba el vino, mis ojos se posaron en el número inscrito en la etiqueta de la botella, una histórica cosecha. El porcentaje de alcohol era sólo del 11 por ciento.

Allí, en la pantalla, la lanzadera despegaba y yo, como siempre, clavado al sillón. Todo lo que tenga que ver con el transbordador me fascina; sobre todo, la delicada forma en que el piloto logra ajustar la posición de un vehículo de 78 toneladas con una precisión de medio grado que le permite acomodarse en trayectorias orbitales para soltar o recoger carga. Facilitan la tarea 44 reactores pequeños repartidos alrededor de toda la nave, algunos de los cuales generan un empuje de tan sólo 24 libras, gracias a un combustible de ignición hipergólica, uno de cuyos componentes es la hidracina.

La hidracina encuentra aplicación menos celeste en la farmacia, la fotografía, los plásticos y el control de la oxidación de tuberías de agua caliente. Y en algo más afín a mi vaso de tinto: la hidracina es un fungicida, el primero de los cuales apareció en Burdeos, capital mundial del suicidio en los años ochenta del siglo pasado. Sobre todo, claro está, para quien hubiera sido vinatero y de repente hubiera dejado de serlo por culpa del mildiú. Este hongo asesino llegó a la viña desde América para sustituir a la *phylloxera*, que a su vez llegó a América para solucionar una plaga anterior. Cuando el mildiú atacó en 1878, llegó el momento de que muchos bodegueros se arrojaran por la borda.

Todo acabó en 1882, cuando Pierre Marie Alexis Millardet, de la Universidad de Burdeos, apareció con un fungicida hecho de caliza, sulfato de cobre y agua. Millardet había aprendido cuanto sabía de Heinrich Anton de Bary, su profesor en la Universidad de Estrasburgo, que aparece en los libros de historia como "el padre de las setas" (léase micología). Hasta ese momento se creía que los hongos eran productos de las plantas sobre las que crecían. De Bary demostró que eran simbiontes (y acuñó el término). Así que, al rociar las plantas, acordémonos de nuestro benefactor.

De Bary empezó estudiando medicina en Berlín con Johannes Müller (autor del clásico *Manual de Fisiología* de 1840). Dio la puntilla a la filosofía natural especulativa que impregnaba la medicina de ese período, donde tenían cabida sanaciones preternaturales, magnetismo animal y fuerzas negativas. El propio Müller mantuvo encontronazos con lo negativo y, hundido en una depresión próxima al suicidio, emigró a Ostende.



En 1847, siendo decano en Berlín, Müller nombró profesor adjunto a uno de alumnos más brillantes, Rudolf Virchow. Un año después, la Revolución de 1848 puso patas arriba Alemania. Virchow se vio luchando en las barricadas. La cuestión social impregnó desde entonces la obra de Virchow, cuyo descubrimiento fundamental fue el funcionamiento básico de la célula. Consideraba el cuerpo una sociedad democrática, un estado libre de individuos iguales, una federación de células. La enfermedad no era otra cosa que un cambio en el estado de las células. Sus planteamientos igualitarios le llevaron a colaborar en la fundación del Partido Progresista alemán en 1861. Cuatro años más tarde provocó que nada menos que el futuro canciller Bismarck le retara a un duelo. Por fortuna para el patólogo, la sangre no llegó al río, y terminó aclamado como "Papa de la medicina alemana".

Mientras se tomaba un corto descanso docente en Würzburg, Virchow enseñó a Victor Hensen, que se significó por su estudio de los órganos auditivos de las patas de los grillos y por su identificación de algunas partes de la cóclea humana. Durante 115 días de 1889, Hensen navegó por el Atlántico en busca de otra de sus obsesiones: el plancton. A tal efecto diseñó una red especial hecha de seda tejida de manera uniforme, similar a la empleada por los molineros para separar harinas. Hensen buscaba algo invisible, diminuto y ubicuo; bueno, siempre y cuando haya nutrientes. Si el plancton agota los nutrientes, los organismos mueren y caen al fondo del océano; transcurridos millones de años se transforman en rocas sedimentarias.

A principios del siglo XX se extrajeron estas rocas para preparar polvo de diatomita. Se utilizaba para hacer cartuchos de dinamita. Téngase en cuenta que la diatomita es especialmente inerte, una cualidad muy apreciada cuando se trabaja con nitroglicerina. Otro uso era más

mundano. Si se depositaban pequeñas cantidades de níquel sobre una lámina de diatomita, el níquel actuaba como catalizador en la combinación de moléculas de hidrógeno con moléculas de aceite que fuera una mezcla de aceite de palma y de margarina, de manera que el aceite adquiría, a temperatura ambiente, suficiente consistencia para untarlo.

En otra ocasión aludí al inventor de la margarina, Mège-Mouriès, en 1869. También patentó las pastillas efervescentes y, en 1845, el empleo de yema de huevo para curtir pieles. Eran días felices para los fabricantes de pasta. En su trabajo sobre la margarina, por el que se le concedió la Legión de Honor, Mège-Mouriès se había inspirado en Michel-Eugene Chevreul, autor de un libro sobre las grasas que fue redactando a lo largo de casi noventa años en el Museo de Historia Natural de París; aquí estudió, analizó y nombró cada uno de los ácidos grasos. Hizo del incierto negocio del fabricante de jabones una ciencia exacta. Gracias al trabajo de Chevreul, los industriales pudieron fabricar jabones mejores y más baratos. Sus conocimientos grasos también hicieron posibles velas más brillantes. No debe sorprendernos si nos cuentan que, cuando el hombre que había hecho el mundo más limpio y luminoso cumplió los cien años, el país entero se tomara el día libre.

Uno de los productos que se necesitan para hacer jabón es un álcali. Cuando Chevreul inició su trabajo, éste se obtenía de las cenizas de la madera. La mayoría de los bosques franceses abastecía a los constructores de barcos, así que tanto franceses como ingleses buscaban fuentes alternativas. Una de estas posibilidades parecía yacer en las rocosas costas de Bretaña y de Escocia occidental: las cenizas de algas marinas. Transformar el varec en ceniza era simple y rentable. Se obtenía de las rocas y se quemaba en un pozo excavado en el suelo bajo la presión de piedras, y así se producía un enorme y duro pastel que se podía desenterrar para uso posterior. En Escocia, la sustitución de la ceniza por esa masa financió muchos castillos pseudogóticos para propietarios de lo que antes eran playas pedregosas sin valor.

En 1811, en Francia, esta ceniza llegó al lecho de nitratos en el que trabajaba Bernard Courtois, fabricante de pólvora y descubridor accidental de un nuevo elemento. Ese año, Courtois regó la ceniza con agua, para evaporar las sales que necesitaba. Al añadir una más que generosa cantidad de ácido sulfúrico para acabar con los compuestos de sulfuro sobrantes, se produjeron en las cubas enormes cantidades de un gas de color violeta. Dos años después, lo analizó uno de los mayores químicos de Francia, que lo nombró según la palabra griega para ese color: yodo.

El analista, Joseph-Louis Gay-Lussac, hizo algo parecido a lo que comentábamos al principio de la sección. Subió hasta una altura récord, para hacer ciencia en globo. También fue Gay-Lussac quien me informó de que el vino iba a ser ligero. La cifra de alcohol por volumen de la etiqueta se conoce como número de Gay-Lussac.

Manuales

Análisis

ANALYSIS I, por Herbert Amann y Joachim Escher. Birkhäuser; Basilea, 1998.

Este libro es el primero de una obra en tres volúmenes dedicada a una introducción al análisis matemático. Por su contenido y método es un texto con destino únicamente a estudiantes de primer año de una licenciatura en matemáticas. En sus 445 paginas, se limita al cálculo diferencial de funciones de una variable real o compleja, aunque es autosuficiente y sistemático.

El libro esta dividido en cinco capítulos. El primero, titulado "fundamentos", estudia los números. Comienza con una breve introducción al lenguaje de la lógica elemental y de la teoría de conjuntos, y llega a los números naturales a partir de los axiomas de Peano. A continuación, tras dos secciones dedicadas a estructuras algebraicas, polinomios y series formales, define los números racionales en la forma habitual, para luego construir los reales siguiendo el método de Dedekind, y el cuerpo de los complejos como extensión algebraica del cuerpo real. Concluye con una sección de álgebra lineal.

El segundo capítulo explica la convergencia de sucesiones, primero en un espacio métrico y luego en cuerpos de números, la estructura algebraica de los espacios de sucesiones numéricas, lleva a los espacios vectoriales normados y a los espacios de Banach, en los cuales se estudian las series. El capítulo termina con una sección dedicada a las series de potencias formales.

El tercer capítulo versa sobre la continuidad. Primero se estudia topología general, con los resultados clásicos sobre compacidad y conexión, teniendo siempre presentes los casos particulares de los espacios métricos y los cuerpos real y complejo y luego las funciones de una variable real, con una sección sobre funciones exponencial y logarítmica y las funciones trigonométricas reales, que finaliza con el logaritmo complejo.

En los dos últimos capítulos se abordan, respectivamente, el cálculo diferencial en una variable y las sucesiones de funciones; en el primero de ellos, se estudia la diferenciabilidad de funciones, inicialmente de una variable, real o compleja, con valores en un espacio normado, pero de modo inmediato se pasa a las funciones reales de variable real. Lo más interesante de este capítulo es una prueba elemental del teorema de Banach del punto fijo para aplicaciones contractivas. La teoría elemental de sucesiones de funciones, que concluye con una sección dedicada a las funciones analíticas y otra al teorema de Stone Weierstrass de aproximación por polinomios, es el objeto del último capítulo.

Como se puede apreciar por las líneas anteriores, en casi todas nuestras universidades se han escrito textos, que si bien son de redacción algo menos precisa, tienen contenidos similares al aquí analizado. Digamos por último que la obra contiene numerosos y bien elegido ejemplos.

JOSÉ MANUEL AROCA

Ilustración

General

ISAAC NEWTON. EIGHTEENTH CENTURY PERSPECTIVES, por A. Rupert Hall. Oxford University Press; Nueva York, 1999. **LEONHARDI EULERI: COMMENTATIONES MECHANICAE ET ASTRONOMICAE AD PHYSICAM COSMICAM PERTINENTES**. Edición preparada por Eric J. Aiton y apéndice de Andreas Kleinert. Birkhäuser; Basilea, 1996. **GEORG CHRISTOPH LICHTENBERG: OBSERVATIONES**. Edición preparada por Dag Nikolaus Hasse; Wallstein Verlag; Göttingen, 1997.

ENLIGHTENMENT AND PATHOLOGY. SENSIBILITY IN THE LITERATURE AND MEDICINE OF EIGHTEENTH-CENTURY FRANCE, por Anne C. Vila. The Johns Hopkins University Press; Baltimore, 1998. **THE LETTERS OF DOMINIQUE CHAIX, BOTANIST-CURÉ**, por Roger L. Williams. Kluwer Academic Publishers; Dordrecht, 1997. **SCIENCE IN THE SERVICE OF EMPIRE. JOSEPH BANKS, THE BRITISH STATE AND THE USES OF SCIENCE IN THE AGE OF REVOLUTION**, por John Gascoigne. Cambridge University Press; Cambridge, 1998.

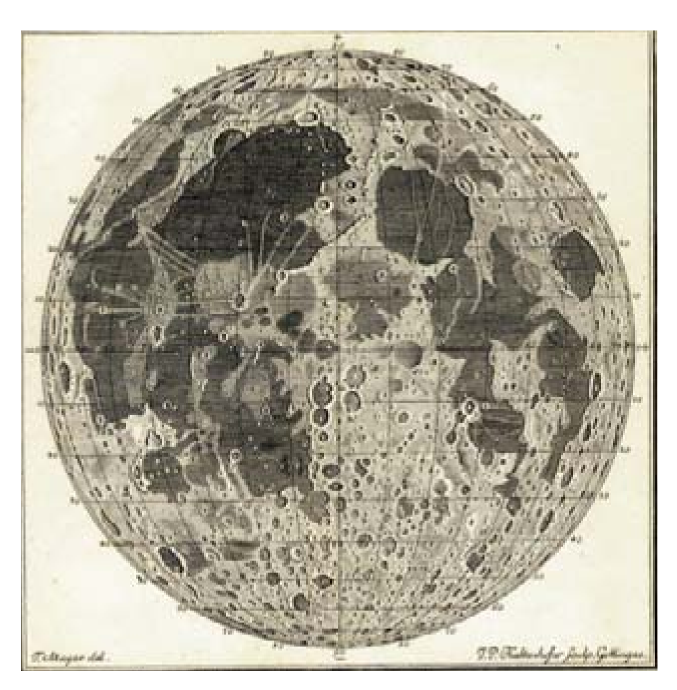
THE ENLIGHTENMENT OF JOSEPH PRIESTLEY. A STUDY OF HIS LIFE AND WORK FROM 1733 TO 1773, por Robert E. Schofield. The Pennsylvania State University Press; University Park, 1997. **OEUVRES DE LAVOISIER. CORRESPONDENCE. VOLUME VI**. Edición dirigida por Patrice Bret. Académie des Sciences; París, 1997.

La Ilustración va indisolublemente unida al nombre de Newton. No fue el único, pero sí la luz de referencia. Sobre la atmósfera que rodeó a ese foco, sobre la conciencia que se tenía de ser deudores de su magisterio reflexiona el autor de *Isaac Newton. Eighteenth Century Perspectives*, que nos sirve de pórtico.

A la manera de los libros de folletones del XVIII, Hall ha cosido tres biografías extensas del padre de la mecánica aparecidas en esa centuria: el *Eloge* de Bernard le Bovier de Fontenelle, "Newton" (entrada del *General Dictionary*) de Thomas Birch y *Elogio del Cavalieri Isaaco Newton* de Paolo Frisi. Por mor de exhaustividad agrega el artículo que le dedicó la *Biographia Britannica* en 1760 y el que incluyó Charles Hutton en su *Mathematical Dictionary* de 1798.

Al elogio de Bovier de Fontenelle, publicado en 1728, un año después de la muerte de Newton, se debe la idea difundida en Europa sobre su vida y obra. Los *Principia* y la *Opticks* realzaban los mejores anaqueles y su contenido se debatía en cenáculos y academias, incluidas las tertulias donde se divulgaba "newtonianismo per le Dame". Interesaba también el hombre, que nadie conocía mejor que su sobrina y ama de llaves Catherine Barton, casada en 1717 con John Conduitt, quien facilitó a Fontenelle los mimbres para el *Eloge.* Conduitt había ido amasando sus propios recuerdos con los de su mujer, los de John Wickins, compañero de Newton en el Trinity, y los de Humphrey Newton,

escribano de los *Principia*, para crear una leyenda, que no buscaba tanto la fidelidad de los hechos cuanto la ejemplaridad del personaje. Aprovecha la ocasión para "corregir" al francés en el asunto de la primacía del cálculo infinitesimal. Había Fontenelle escrito en el *Eloge* del Marqués de L'Hôpital que el cálculo diferencial lo habían inventado Leibniz y, contemporáneamente, Newton. A eso alude Conduitt: "Me parece que ya sabe usted, y de ello están convencidos los alemanes también, que sir Isaac no sólo inventó el método de fluxiones, mucho antes de que Leibnitz supiera nada del tema, sino que Leibnitz lo tomó de él."



Mapa de la Luna, de Tobias Mayer

Birch completa su biografía, la primera original inglesa, con una selección del epistolario. No le entusiasma su potencia matemática y presta mayor atención a la óptica. Pero el primer estudio extenso de Newton es el que le consagra Frisi, sacerdote, matemático y estudioso de la nueva mecánica. Decía que, para entender en su integridad los *Principia*, había que se aplicarse a ellos durante no menos de medio siglo; en su opinión, los únicos capaces de enjuiciar la obra eran Christiaan Huygens, G. W. Leibniz y Jakob Bernoulli. Frisi se esforzó por situar a Newton en su justo marco histórico.

Cuestión de física newtoniana por excelencia era la de las mareas. En 1739 Leonhard Euler escribía a Bovier de Fontenelle interesándose por la suerte del trabajo que había remitido a la Academia de Ciencias de París para optar al premio convocado por ésta en torno a los flujos y reflujos del mar. La monografía forma parte destacada del volumen *Leonhardi Euleri: Commentationes Mechanicae et Astronomicae ad Physicam Cosmicam Pertinentes*.

La "física cósmica" abarcaba entonces lo que hoy entenderíamos por física del aire y astronomía. Al abordar la composición de la atmósfera, inspirado en la teoría de la elasticidad del aire de Johann Bernoulli, habla Euler de la fuerza centrífuga de una materia sutil que gira en el interior de partículas esféricas, constituyentes del aire. Esa materia sutil se retenía en glóbulos de aire envueltos en corteza acuosa, cuyo espesor variaba de acuerdo con la humedad. En estado de máxima compresión, la materia sutil llenaba el interior del glóbulo. Por lo que a la astronomía respecta, Euler analizó la naturaleza y órbitas de los cometas; asoció el origen de la cola con el de la luz zodiacal, y defendió la existencia de la atmósfera lunar con los datos que le suministró la observación de un eclipse anular del Sol.

La exploración geográfica había corroborado la universalidad de las mareas. Se realizaron observaciones sistemáticas de su comportamiento en puertos ingleses, cuyos resultados aparecieron en las *Philosophical Transactions*, y más tarde en otros continentales, examinadas por Jacques Cassini. Sobre la naturaleza de las mareas se barajaban tres hipótesis, la galileana, la cartesiana y la newtoniana. Galileo atribuía "il flusso e reflusso del mare" al efecto de aceleración y deceleración ejercido por la composición de los movimientos anual y diurno. Descartes arrancaba de su teoría de los vórtices celestes; en ese contexto, las mareas eran un efecto exclusivo de la Luna. Al restringir la circulación del fluido del vórtice terrestre, la Luna provocaba una presión adicional sobre la Tierra, desplazándola del centro del vórtice hasta que la fuerza extra ejercida fuera la misma en ambos lados. La teoría de Newton sobre las mareas, basada en el principio de la gravitación universal, se describe en los libros primero y tercero de los *Principia*. Imaginó un canal que ceñía la Tierra por el ecuador y aplicó a las partículas de agua del mismo las leyes que había deducido para el movimiento de un satélite afectado por un tercer cuerpo.

Euler reconoce que los componentes horizontales de las fuerzas desequilibrantes entre los cuerpos que intervienen son los responsables de la generación de las mareas. Formula la teoría del equilibrio introduciendo la condición de que la fuerza resultante en la interacción sea perpendicular a la superficie del agua. Euler se propuso dar armazón matemático a su tesis, si bien con escaso éxito, pues todavía no había ahondado en dinámica de fluidos.

No sólo las mareas. En el siglo XVIII seguía apremiando la determinación de la longitud en pleno océano. Tomó parte en esa lid Johann Tobias Mayer (1723-1762) con una teoría lunar fundada en el sistema newtoniano y en las ecuaciones matemáticas de Euler. Fue Mayer cartógrafo y astrónomo, con un talento precoz para el dibujo arquitectónico. Confeccionó nuevas tablas lunares y solares de fina precisión y acometió la investigación de las posiciones del satélite en conjunción. De sus escritos inéditos se hizo cargo Georg Christoph Lichtenberg (1742-1799), incluidos en las *Observationes*, ahora reimpresas.

Lichtenberg enseñó en la Universidad de Göttingen. Experto en geodesia, astronomía y geometría, cuestionó la validez de los postulados de Euclides y buscó la armonización de la teoría ondulatoria de la luz con la corpuscular. Representa el científico en su mejor expresión de teórico robusto y capaz de organizar los ensayos, exigiendo siempre suma precisión en las mediciones. En las *Observationes* se recogen tres proyectos realizados entre 1770 y 1778, dedicados a Georges III de Inglaterra: "Observationes astronomicae per annum 1772 et 1773", edición de las "Opera inedita" de Mayer y "Nova methodo naturam ac motum fluidi electrici investigandi".

Cuenta aquí que, habiendo el monarca británico encomendado a los ingenieros militares el mapa de sus posesiones en suelo alemán, se le



Joseph Banks (centro)*, óleo de John Hamilton Mortimer*

confiaron las observaciones astronómicas de Hannover (orto), Osnabrück (ocaso), Stade (norte) y Göttingen (sur). Dispone de un cuadrante, un reloj astronómico y un tubo dolondiano. Saca a la luz las limitaciones y los errores de origen instrumental. Explica los enfoques adecuados y anota minuciosamente las observaciones, que repite cuantas veces cree necesario.

La edición de Mayer, comentada, responde también a un encargo. Se hace eco de la labor del padre José Antonio Alzate en la medición del grado y la altitud sobre el nivel del mar en México. Y se detiene en la descripción del termómetro que Mayer se construyó en 1755. Nada más interesante, insiste, que conocer con pormenor los instrumentos de los que se vale la investigación, de cuya exactitud depende la veracidad de los cálculos. Era el de Mayer un termómetro de mercurio, con un tubo estrechísimo y receptáculo oblongo de una anchura de unos 2/5 del dedo de París y de una longitud de 1 ¾; los puntos de fusión y de ebullición están entre +32 y +212 de la escala de Fahrenheit; tiene seis escalas: delisliana, fahrenheitiana, reaumuriana, escala de expansión del aire, celsiana y escala de calor medio anual.

El racionalismo ilustrado no entraba en contradicción con la sensibilidad. Antes bien, orientará ésta el nuevo rumbo de la biología, medicina, filosofía y, por supuesto, la literatura. Anne C. Vila ha sabido captarlo en *Enlightenment and Pathology.* Entre cuerpo y mente, entre órganos y facultades intelectuales, había una interfaz, el *sensorium commune*, de naturaleza disputada según las opciones reduccionistas del expositor.

Para Albrecht von Haller el punto de encuentro de la sensibilidad y su complementaria la irritabilidad se hallaba en la teoría de la fibra. Basada en modélicas investigaciones experimentales, razonó su tesis en *Disertación sobre las partes sensibles e irritables de los animales*. Desde una inclinación vitalista, Théophile de Bordeu y con él la escuela de Montpellier promovieron, por contra, una medicina filosófica centrada en los órganos de la sensibilidad.

Se perseguía anclar, localizar, las llamadas fuerzas vitales. Haller, experimentador incansable, engarzó ensayo tras ensayo para mostrar el fundamento diverso de la sensibilidad y la irritabilidad. Entendía por irritabilidad la capacidad de las fibras musculares para contraerse en presencia del estímulo. Por sensibilidad, la capacidad de la fibra nerviosa de experimentar sensaciones. La irritabilidad gobierna el dominio de la fibra muscular. De sus ensayos con cerebros y nervios extrae las notas de la sensibilidad. Pero no aporta una teoría coherente de la asociación del sistema nervioso con las operaciones de la sensibilidad, integración que, reconoce, se da en el cerebro, origen de todos los nervios y centro de representación de las sensaciones.

Haller no se proponía cortar de raíz sus vínculos con la fisiología precedente, la de su mentor Hermann Boerhaave, sino reelaborarla. Figura

clave del iatromecanicismo, Boerhaave aplicaba a la estructura y funcionamiento del cuerpo los principios de la geometría y la física. Reducía la fisiología a la "digestión": compete a la máquina viva producir y refinar los tres fluidos vitales, a saber, el quilo, sangre y fluido nervioso.

En el ecuador del XVIII la medicina francesa tomó un giro vitalista. Tras la huella de George-Ernst Stahl la facultad de medicina de Montpellier se alejaban del iatromecanicismo para abrazar una visión holista de la vida. Había una manifiesta desazón ante las aplicaciones de los iatromecánicos con sus tratamientos agresivos de sangrías, trepanaciones y purgas drásticas. Despertó, asimismo, un movimiento de recuperación de la clínica hipocrática con la confianza del poder de la naturaleza para curarse a sí misma o prevenir la enfermedad mediante el uso prudente del alimento, el sueño, la actividad, la evacuación o las pasiones.

La sensibilidad explica también la pasión botanófila que prende en el siglo de las Luces. Llega hasta la última aldea. Sirvan de ejemplo *The Letters of Dominique Chaix*, epistolario que nos descubre el desarrollo de la botánica a través de 170 misivas que éste remitió a Dominique Villars entre 1772 y 1799. No nos ha llegado ninguna de las respuestas de Villars y todo indica que Chaix no tuvo interés en guardarlas una vez cumplida su función informativa. Al hilo de esa dilatada colaboración Villars escribió una flora regional, la *Histoire des plantes du Dauphiné*. La contribución de Chaix no se limitó al catálogo que aparece en el primero de los tres volúmenes de que consta. Somete a continuo examen las especies de esa provincia y corrige la redacción latina, siguiendo la nomenclatura binomial y el sistema sexual de clasificación de la reforma linneana.

Chaix cultivaba un jardín de unos 800 metros cuadrados de superficie, insuficientes para sembrar muchas plantas, pero al alcance de su capacidad económica. Reservaba la cuarta parte para huerta. El resto lo dedicaba a especies insólitas o desconocidas, entre cuarenta y sesenta cada año. En un cuaderno anotaba el tipo de semilla, su germinación, variedades, enfermedades y cambios operados por el cultivo; las plantas pasaban luego a un herbario para dejar sitio a otras nuevas.

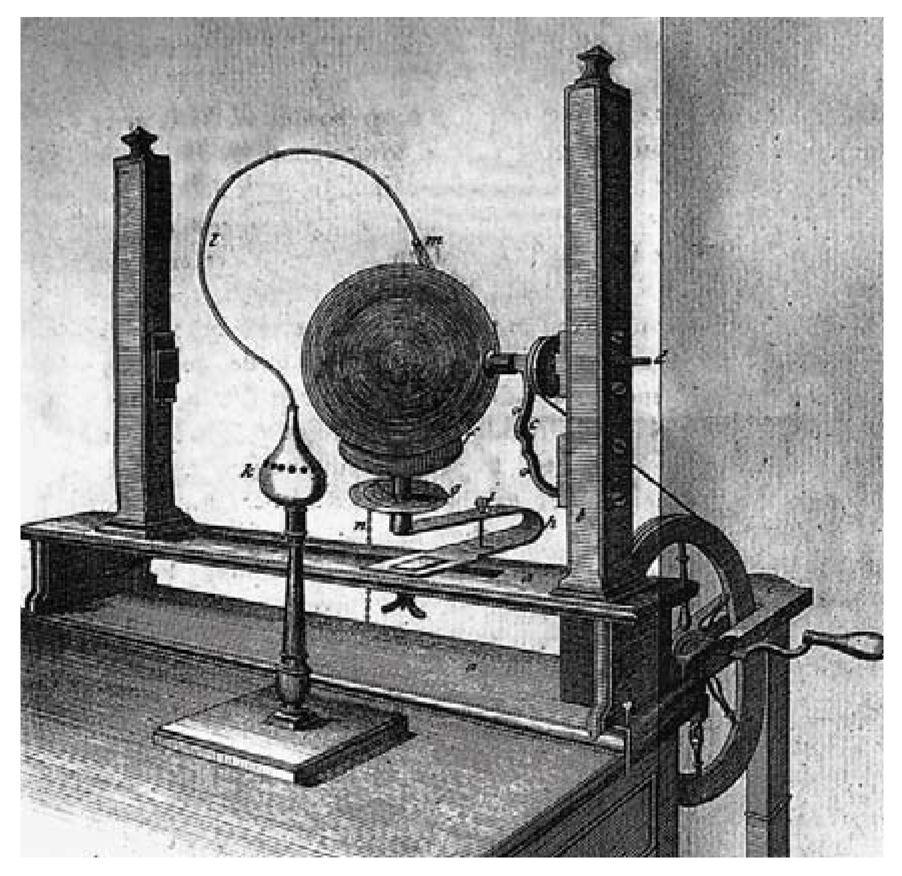
Joseph Priestley

Villars, quince años más joven que Chaix y campesino como él, nació en 1745. Muerto su padre en 1760 quedó como jefe de una familia de ocho hermanos, con una escuálida herencia, que pudo en parte completar con un temprano matrimonio. Conoce a Chaix, poco antes de trasladarse a Grenoble para aprender los rudimentos de la cirugía y labrarse un futuro. Pero lo que en un principio iba a ser una estancia breve se prolongó decenios y el barniz artesanal devino carrera médica. Al principio, el maestro en botánica era Chaix. "Las plantas que me habeis enviado han enraizado muy bien y estoy contento con su desarrollo… No sé por qué creeis que la *Stachys* es *alpina*. ¿Se trata de un error? No habiendo visto la flor, no puedo pronunciarme." "Le estoy preparando unos pliegos de plantas secas." Las cartas primeras transmiten la escasez de medios del preste: "A falta de otros libros me manejo con las *Institutiones rei herbariae* de Tournefort, las *Rariorum aliquot stirpium* de Clusius, las *Pemptades* de Dodoens y las *Classes plantarum* de Linneo." Con los años y la ayuda de Villars procurará ponerle remedio: "Cómpreme los libros de que me habló con mi dinero. Me interesa las *Plantas veroneses* de Séguier; "Si pudiera hacerse con la *Agrostotographia sive Graminum* de Johann Scheuchzer nos permitiría aclararnos en esa espinosa familia. Scapoli no le servirá de ayuda en *Avena*."

En Grenoble, Villars aprende a herborizar acompañado de un barómetro para medir la altitud y una gran lupa para observar mejor los caracteres. Con el tiempo se sentiría insatisfecho de su microscopio de Lionnet. Teje su propia red de relaciones, que llegan a Narbonne, donde está Pourret, a Montpellier, sede de Gouan, y, sobre todo a París, a donde se traslada para visitar a los Jussieu (Bernard y Antoine-Laurent) y André Thouin, del Jardín Real. Chaix y Villars muestran, en la madurez, pleno dominio del campo; por ejemplo, al fiar en Cavanilles la clasificación de los geranios.

De la aldea a la metrópoli. La botánica, convertida por Joseph Banks en instrumento del estado, cobra una dimensión inédita. Se explica por extenso en *Science in the Service of Empire.* Educado en Harrow, Eton y Oxford, Banks heredó fortuna suficiente para vivir con absoluta independencia. En 1768, se embarcó en el *Endeavour* del capitán Cook para observar el paso de Venus y conocer vegetales y animales prometedores. De la expedición se trajo 1300 nuevas especies de plantas. Diez años más tarde se le nombró presidente de la Regia Sociedad. Desde esa atalaya movió la voluntad de la corona hacia los intereses de la ciencia, asociados en adelante al progreso económico de la nación, y no sólo con la introducción del té chino en la India y del árbol del pan en el Caribe.

En un libro precedente, Gascoigne trazaba la metamorfosis del coleccionista habilidoso en especialista un tanto asistemático. Ahora lo perfila en el trasfondo de una Inglaterra convulsa que conoce tres revoluciones, la americana, la francesa y la industrial. Sin actividad política directa, no se toma ninguna medida importante que no se



Máquina eléctrica empleada por Priestley

le consulte, trátese de los jardines de Kew o de la adquisición subrepticia de la oveja merina española. Este “ministro de asuntos filosóficos”, como le llamaron, botánico a la postre, confiaba en el desarrollo de la ciencia natural para la promoción del campo y el abastecimiento de las ciudades. Aplicó lo que entonces se entendía por “conocimiento útil”.

La química fue, sin duda, la perla de la Ilustración. *The Enlightenment of Joseph Priestley. A Study of His Life and Work from 1733 to 1773* refleja la situación experimental en Inglaterra; *Oeuvres de Lavoisier. Correspondence*, el armazón teórico francés. Pese a su papel central, ésta de Robert Schofield es la primera biografía de Priestley (1733-1804), que escribió largamente (más de 150 títulos) sobre teología, electricidad, química, política, gramática, retórica y filosofía de la educación.

Priestley recuerda en su madurez tres obras que le influyeron, la *Lógica* de Watts, los *Elementos Matemáticos de Filosofía Natural* de Gravesande’s y el *Ensayo sobre el entendimiento humano* de Locke. La sombra de este pensador empirista persiste omnipresente. Las sensaciones nos revelan, afirmaba Locke, la existencia de sustancias sólidas, extensas en el mundo, que poseen cualidades primarias de masa, figura, número, situación y movilidad; en éstas fundamos nuestras ideas de colores, sonidos, gustos, aromas, etcétera, cualidades sensibles o secundarias. En los *Elementos Matemáticos* de Jacob Gavessande’s aprendió Priestley el contenido y métodos de la ciencia natural, repleta entonces de bombas de aire, termómetros, lentes, espejos, poleas y engranajes, aunque transido también de filosofía corpuscular newtoniana.

Llega a la ciencia atraído por la fascinación de la electricidad. Desde el descubrimiento de la botella de Leyden se vivía con excitación cuanto atañía a la electricidad. Priestley conoce a Franklin en 1765: “yendo a Londres, y tras presentarme al Dr. Price, Mr. Canton, Dr. Watson (el médico) y el Dr. Franklin se me invitó a asistir a más exhibición de filosofía natural que la que yo hubiera realizado o enseñado antes”. Publicó en 1767 *The History and Present State of Electricity*, en el momento oportuno, cuando los materiales no eran ni escasos ni excesivos y su dispersión invitaba ordenarlos. Prosigue sus propias investigaciones en electricidad estática, en fenómenos de descarga coronal, que presenta ante la Regia Sociedad.

Hasta iniciar los “Experiments and Observations on Charcoal”, que señalan su transición a la química. Priestley mantenía que la conductividad en el carbón vegetal y en los metales estaba causada por el flogisto. Aunque en su química neumática concedía mayor importancia a los procesos implicados y a las reacciones que a las sustancias o productos, identificó numerosos gases: HCl, NO, N_2O, NO_2, NH_3, N_2, CO, SO_2, SiF_4 y, sobre todo, O_2. Ocurría esto último en 1774. Había recibido una lente grande, que empleó para vaporizar diversas sustancias. Cuando calentó óxido de mercurio (HgO) se encontró con un gas incoloro que no era muy soluble en agua y que una candela lo quemaba dando una luz sorprendente. Priestley halló que el O_2 era despedido por las plantas y resultaba vital para los animales.

El primer volumen de la *Correspondence* de Lavoisier apareció en 1955. Este sexto abarca el período entre la preparación de los Estados Generales y los comienzos del Legislativo (1789-1791). Licenciado en derecho, Lavoisier se inicia en meteorología con el padre La Caille, en electricidad con el abate Nollet, descubre la botánica en el Jardin du Roi con Bernard de Jussieu, estudia anatomía en la Escuela de Medicina y Guettard le enseña mineralogía y geología. En un curso de química impartido por Rouelle adquiere los rudimentos técnicos. Por encima de todo, fue el fundador indiscutido de la química moderna, con una poderosa habilidad para el análisis.

En 1768 entra en la Academia. Sus primeras memorias analizan el yeso, los meteoritos, el carbón vegetal, el plomo y las aguas minerales. Para éstas crea un método original de análisis: la medida de la densidad con ayuda de un nuevo tipo de aerómetro; deshace el mito de la conversión del agua en tierra y participa en los ensayos de combustión del diamante bajo el efecto de unos espejos ustorios.

De esa rutina le despierta, en 1772, la nueva química de los gases. El aire fijo (CO_2 o dióxido de carbono), ese gas que los ingleses dicen fijado en ciertos compuestos orgánicos, le desazona. ¿Sería esa fijación la causa del aumento del peso observado cuando, por simple calentamiento, se transforma un metal en su óxido? Para resolverlo, repite experimentos de otros autores. Escoge el fósforo, que se calcina y produce ácido fosfórico. Con unas

balanzas que le preparan Mégnié y Fortin, pesa con precisión los elementos presentes antes y después de la reacción. Habiendo colocado en una redoma abierta medio gramo de fósforo, pesa el conjunto y lo coloca bajo una campana de vidrio; con la ayuda de un espejo ustorio provoca la ignición del fósforo, que arde en la redoma y da ácido fosfórico; al final de la operación, el aire de la campana ha disminuido en la misma proporción en que ha aumentado el peso de la redoma. Está claro que el aire de la campana ha sido fijado por el fósforo y que esta fijación explica el aumento del peso. Lo vuelve a ensayar con el azufre, que quema bajo una campana de vidrio transformándose en ácido sulfúrico. El peso conjunto de la campana más azufre es el mismo antes y después del experimento: el de la campana no ha cambiado; sólo ha aumentado el peso del azufre, aumento que se produce necesariamente a expensas del aire encerrado en la campana. La calcinación del plomo, la del estaño, dan los mismos resultados.

Un golpe mortal contra la teoría del flogisto, formulada por Stahl y admitida por todos los químicos. La combustión no consiste en una liberación de flogisto. A este descubrimiento seguirán otros decisivos, respaldo de síntesis conceptuales que establecen las bases de la química moderna. Sin ir más allá: ¿es el aire entero lo que se capta en el curso de la calcinación o sólo una parte? ¿No será ésta el gas que libera la calcinación de los óxidos? Es lo que demuestra en 1775 calcinando el óxido rojo de mercurio. El nuevo gas activa las combustiones y mantiene la respiración de los animales. Priestley, su rival inglés, lo llama *aire deflogisticado*; para Lavoisier, ya fisiólogo, es *aire vital*.

El aire de la atmósfera no es un elemento, es decir, un cuerpo simple, sino mezcla de muchos gases. Está compuesto de aproximadamente un cuarto de aire desflogisticado o aire respirable (oxígeno) y de tres cuartas partes de aire mefítico y dañino (nitrógeno). En 1783, buscando identificar el producto de la combustión del hidrógeno en presencia de oxígeno, obtiene el agua. No se trata, pues, de ningún elemento simple, sino que está compuesta de hidrógeno y oxígeno. Ni el aire, ni el agua, ni la tierra son elementales, sino cuerpos compuestos.

Desde la publicación del *Traité élémentaire de la chimie* la escuela francesa de Lavoisier afianza su liderazgo. Pero le falta un vehículo de expresión. Cierto es que desde comienzos de los setenta circula una revista científica mensual, las *Observations sur la Physique*, pero en ella la química sólo es una más con la física y la historia natural. Y su director, La Métherie, seguía siendo partidario de la teoría del flogisto. Por añadidura, los lavoisierianos no deseaban publicar donde se habían manifestado violentos ataques contra la nueva nomenclatura. En enero de 1788, Guyton prefería enviar un resumen de su curso de química a los *Chemische Annalen*, de Lorenz Florenz Friedrich Crell. En un principio se pensaba en "traducir los anales químicos de Crell y agregar lo que se hacía nuevo en Francia y en Inglaterra en relación a las artes de la química".

Para llevar la empresa a buen puerto, los químicos franceses vinculados a Lavoisier contaban con su aportación personal, además de disponer de excelentes traductores del alemán y del inglés. Podían confiar en las amistades internacionales de Lavoisier, Guyton y Berthollet. Por último, a falta de una academia que hubiera mermado la libertad, la coherencia del grupo editor formaba una escuela que constituía un sello de marca. En 1789 aparecían los *Annales de Chimie*, cuya gestación constituye objeto primordial de este volumen.

Luis Alonso

Lógica modal

Rejuvenecimiento

Advances in Modal Logic, por M. Kracht, M. de Rijke, H. Wansing y Zakharyaschev. CSLI Publications; Stanford, 1998.

Aunque es una disciplina muy antigua, la lógica modal ha conocido en los últimos veinte años un desarrollo sin par en su dinámica interna y en sus relaciones con otras disciplinas. Revistas, libros y actas de conferencias se consagran a su difusión. *Advanced in Modal Logics* (AiML) es una conferencia bianual celebrada en Berlín en honor de W. Rautenberg, cuyas ponencias se han reunido en un libro.

Podemos clasificar en cinco grupos los temas de investigación abordados. Uno primero representa los trabajos concernientes a la dinámica interna del dominio. Aportan nuevas técnicas de análisis o resuelven problemas fundamentales. De ello la colaboración de M. Marx es una buena muestra sobre las técnicas de los "mosaicos", donde nos da nuevas herramientas para las pruebas de decidibilidad en lógicas modales. V. Shehtman utiliza un concepto similar al de ultraproducto para probar la completitud de una familia de lógicas intermedias y modales.

Otro grupo se refiere a sistemas lógicos donde varias lógicas cohabitan en un mismo marco. P. Blackburn y J. Seligman los llaman sistemas "híbridos". La definición de semánticas adecuadas y la obtención de propiedades como la completitud o la decidibilidad para tales sistemas es un campo interesante de investigación. Los trabajos de D. Gabbay sobre semántica de fibrados o los del grupo de Amsterdam sobre la lógica multidimensional son ejemplos representativos. Un tema ya clásico lo vemos en los sistemas modales constructivos; en esta línea se incluyen las colaboraciones de L. Maksimova sobre los problemas de interpolación o la de C. Grefe sobre los problemas de decidibilidad.

La informática ha desempeñado una función predominante en la evolución de la lógica modal. En el tercer grupo podemos considerar las lógicas modales que están motivadas por las aplicaciones a la teoría de la programación y a la inteligencia artificial, así los escritos de V. V. Spanopulo y V. A. Zakharov, sobre las relaciones entre lógica temporal y lógica causal. En el campo del razonamiento no monótono, la lógica modal, uno de los instrumentos privilegiados, abunda R. Rosati, que da una traducción entre la lógica de Halpern y Moses y de McDermott y Doyle.

Pero no sólo importa la formalización y expresividad. Los métodos de deducción automática desempeñan un papel esencial al ser los que ejecutarán los formalismos considerados. Con ellos constituimos el cuarto grupo, representado por R. A. Schmidt que considera la resolución como método de deducción y nuevo método de decisión para varias lógicas modales proposicionales.

Creamos el quinto grupo con los nuevos dominios de aplicación de la lógica modal, así el de la formalización del espacio. O. Lemon y I. Pratt nos presentan varios modelos donde ciertas relaciones espaciales pueden caracterizarse en términos modales.

Luis Fariñas del Cerro

IDEAS APLICADAS

Howard I. Shapiro, Jay P. Shapiro y Lawrence K. Shapiro

Grúa de oruga gigante

Las grúas pesadas de oruga escenifican una demostración espectacular de los fundamentos de la mecánica clásica. Tan potentes máquinas no son sino palancas en las que un brazo extendido, en este caso llamado aguilón, y la carga que el mismo eleva son equilibrados por un chasis de gran peso auxiliado por contrapesos.

Desde su aparición en los años veinte de este siglo, las grúas de oruga (el nombre alude a su banda de rodadura) no han cesado de perfeccionarse. En las de última generación se emplean aceros de altísima resistencia para reducir el peso del aguilón, sensores de acción remota y microprocesadores para impedir las sobrecargas, amén de transmisiones hidrostáticas de alta presión para conseguir un mando de movimiento de gran precisión. Pese a tales innovaciones técnicas, las grúas de oruga actuales siguen trabajando esencialmente del mismo modo que sus antecesoras, es decir, basándose en las leyes del equilibrio y de la mecánica en general.

El manejo sin peligro de una grúa exige un delicado respeto a las normas establecidas en los manuales a las que complica el desplazamiento del centro de masas del conjunto del sistema, consecuencia de la longitud y posición del aguilón, contrapesos, accesorios, peso de la carga izada y otros factores. Además, el viento debe casi siempre ser tenido en cuenta.

1. PARA EL BUEN FUNCIONAMIENTO de una grúa hace falta que el peso de la carrocería de la máquina (*negro*) estabilice los pesos de la carga izada (*naranja*) y del aguilón (*verde*). El fulcro se encuentra cerca del centro de la oruga y debajo del aguilón (*rojo*). Los momentos estabilizadores deben ser mayores que los momentos de vuelco. (Un momento es el producto de una fuerza o peso por su distancia al fulcro, o punto de apoyo.) Asimismo, debe considerarse el viento (*azul*), capaz de derribar la grúa.

2. EL AGUILON ARRIADO para su montaje o desmontaje impone el límite máximo a su longitud. Obsérvese que el centro de masas del aguilón (*verde*) se encuentra entonces a su mayor distancia del fulcro (*rojo*). Podrían añadirse contrapesos (*marrón*), pero un exceso de éstos entraña el riesgo de que la grúa vuelque hacia atrás cuando el aguilón se ice a su máxima altura.

3. UN AGUILON ALZADO sin carga puede ocasionar el vuelco hacia atrás por la acción de un viento de frente. En tal situación el fulcro se halla en la parte posterior de la grúa (*rojo*). El efecto del momento de la fuerza del viento (*azul*) es máximo para el ángulo de izado máximo (unos 82 grados respecto a la horizontal).

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



CAMBIO CLIMATICO GLOBAL EN VENUS, por Mark A. Bullock y David H. Grinspoon

El clima de Venus, como el de la Tierra, ha variado a lo largo del tiempo como resultado de relaciones, a las que sólo recientemente se ha prestado atención, entre la actividad geológica y el cambio atmosférico.

UNA PEQUEÑA GRAN EXPLOSION, por Madhusree Mukerjee

Un nuevo colisionador de partículas va a crear pronto una materia tan densa y caliente como en el principio del universo.

SINCRONIZACION DEL NACIMIENTO, por Roger Smith

Cierta hormona, de la que se desconocía que se encontrara en la placenta, controla cuándo ha llegado la hora del alumbramiento.

REPRESENTACION VISUAL DEL FETO HUMANO, por Bradley R. Smith

Merced a la microscopía de resonancia magnética, vamos conociendo cada vez mejor los secretos de las primeras fases del desarrollo humano.

EL DRAGON DE KOMODO, por Claudio Ciofi

En islotes del archipiélago indonesio, reina sin rival el mayor lagarto del mundo.

BIOTECNOLOGIA CON CIANOBACTERIAS, por Carlos Garbisu, Alicia Blanco, Itziar Alkorta, María Jesús Llama y Juan Luis Serra

Estos seres unicelulares, responsables del cambio más drástico que ha sufrido la evolución de la vida en la Tierra, presentan una versatilidad metabólica de sumo interés en agricultura y medio ambiente.

ESTRELLARSE EN AUTOMOVIL, por Stefan Thomke, Michael Holzner y Touraj Gholami

Crece el uso de simulaciones informáticas de accidentes para desarrollar con más rapidez y eficacia coches seguros.

METAMORFOSIS DE ANDREI SAKHAROV, por Gennady Gorelik

El inventor de la bomba de hidrógeno soviética se convirtió en defensor de la paz y los derechos humanos. ¿Qué le hizo tomar la decisión de su vida?

